

**Zur Bedeutung der Bodenstruktur für den Ertrag von  
Zuckerrüben – eine pflanzenbauliche und ökonomische  
Analyse in einer Zuckerrüben - Getreide - Fruchtfolge mit  
dauerhaft differenzierter Bodenbearbeitung**

**Dissertation**

zur Erlangung des Doktorgrades  
der Fakultät für Agrarwissenschaften  
der Georg-August-Universität Göttingen

vorgelegt von

**Jan Dieckmann**

geboren in Hildesheim

Göttingen, im Januar 2008

**D 7**

1. Referent: Prof. Dr. B. Märländer

2. Koreferent: Prof. Dr. W. Lücke

3. Prüfer (Disputation): PD Dr. J. Schulze

Tag der mündlichen Prüfung: 31.01.2008

## Zusammenfassung

Zu Beginn der 1990er Jahre wurde auf landwirtschaftlichen Großbetrieben in Süd- und Ostdeutschland ein Bodenbearbeitungsversuch mit langjährig differenziert bearbeiteten, ortsfesten Großparzellen angelegt, um die Wirkung der Bodenbearbeitung [konventionell gepflügt (25-30 cm tief), konservierend mischend bearbeitet (10-15 cm und 20-25 cm tief) und Direktsaat] auf Ertrag und Rentabilität von Winterweizen und Zuckerrüben zu untersuchen.

Die langjährige Auswertung der Versuche zeigte, dass sowohl in Zuckerrüben, als auch in Getreide mit konservierender, mulchender Bodenbearbeitung ein ähnlich hoher Bereinigter Zuckerertrag (BZE) wie bei Pflugbearbeitung erzielt wurde. Lediglich Direktsaat führte sowohl beim Anbau von Winterweizen (-4 %) als auch von Zuckerrübe (-15 %) zu Mindererträgen. Der deutlich niedrigere BZE bei Direktsaat konnte im Gegensatz zu Winterweizen durch geringere Produktionskosten nicht kompensiert werden.

Um die Ursache für Wachstumsunterschiede bei Zuckerrüben zu ermitteln, wurde in diese Versuchsserie zwischen 2003 und 2005 eine Studie zum Einfluss differenzierter Bodenbearbeitung auf chemische und physikalische Bodeneigenschaften und deren Beziehung zum BZE integriert.

Abnehmende Bearbeitungsintensität führte zu einer Anreicherung von organischem Kohlenstoff ( $C_{org}$ ) und Gesamtstickstoff ( $N_t$ ) sowie ein Anstieg des  $C_{org}/N_t$ -Verhältnisses in der Oberkrume. Der Gehalt an pflanzenverfügbarem Magnesium (MG) wurde nicht von der Bodenbearbeitung beeinflusst, während bei Phosphor (P) und Kalium (K) eine Anreicherung in der Oberkrume wie bei  $C_{org}$  und  $N_t$  beobachtet wurde. Eine geringfügige Abreicherung im unteren Abschnitt der Krume bei konservierender Bodenbearbeitung trat nur bei K auf. Insgesamt führte in der vorliegenden Versuchsserie eine Reduzierung der Bearbeitungsintensität nicht zwangsläufig zu einer eingeschränkten Nährstoffversorgung.

In den meisten Umwelten wurde mit den erhöhten Humusgehalten sowie geringfügig höheren Nährstoffgehalten in der Oberkrume des Bodens sogar ein positiver Effekt des Pflugverzichts auf diese Parameter der Bodenfruchtbarkeit beobachtet, der sich tendenziell förderlich auf das Pflanzenwachstum auswirken dürfte.

Demgegenüber zeigte die detaillierte Untersuchung der Bodenstruktur deutliche Unterschiede in Abhängigkeit des Bodenbearbeitungsverfahrens. Mit abnehmender Bodenbearbeitungsintensität stiegen Trockenrohdichte (TRD) und Eindringwiderstand (EW) bei gleichzeitig sinkender Luftkapazität (LK) in der Krume bis zu einer Bodentiefe von 27 cm an. Die untersuchten Parameter zeigten sowohl untereinander, als auch zum BZE eine hohe Korrelation. Einzelne Parameter erklärten bis zu 60 % der bearbeitungsbedingten Ertragsvariation. Über die gemeinsame Wirkung von TRD in 3-7 cm Bodentiefe, EW in 3-27 cm Bodentiefe und LK in 3-18 cm Bodentiefe konnten bis zu 77 % des Bodenbearbeitungseffektes erklärt werden. Aufgrund der hohen Multikollinearität der untersuchten Parameter konnte der genaue Wirkungsmechanismus der veränderten Bodenstrukturparameter auf den BZE nicht abschließend geklärt werden.

Insgesamt belegen die Untersuchungen, dass mit konservierender Bodenbearbeitung der Deckungsbeitrag gesteigert werden kann und dass beim Anbau von Winterweizen auch das Verfahren Direktsaat rentabel sein kann. Demgegenüber benötigt die Zuckerrübe für einen hohen Deckungsbeitrag, der eng mit dem BZE verbunden ist, eine deutlich höhere Bodenbearbeitungsintensität in Form einer 10-15 cm tiefen Lockerung. Veränderte Produktionsbedingungen und dabei insbesondere steigende Produktionskosten werden die Rentabilität konservierender Bodenbearbeitungsverfahren weiter steigern.

## Abstract

In the beginning of the 1990th a large-scale field trial with permanent plots on arable farms in southern and eastern Germany was established to determine the effect of various tillage systems [mouldboard ploughing (25-30 cm deep), conservation tillage with a rigid tine cultivator (10-15 cm and 20-25 cm deep), direct drilling] on yield, quality and economic performance of winter wheat and sugar beet crops.

Winter wheat and sugar beet yield did not significantly differ between conservation tillage systems and ploughing, whereas, in both crops a yield loss occurred with direct drilling (-4 % winter wheat and -15 % sugar beet). With regard to the net margin, lower production costs obtained with direct drilling compensated for the yield decrease in winter wheat but not in sugar beet.

In 2003-2005 the effect of tillage treatments on soil chemical and physical properties and white sugar yield (WSY) was investigated to detect the reason for differences in yield reduction of tillage intensity significantly WSY. However, with conservation tillage and direct drilling concentration of soil organic carbon ( $C_{org}$ ), soil nitrogen ( $N_t$ ) and  $C_{org}/N_t$ -ratio increased in the upper layer of the topsoil, but remained unaffected in the lower topsoil and subsoil. Similarly, plant available P and K was accumulated in the upper topsoil, but K slightly decreased in lower topsoil horizon. Mg was not influenced by tillage treatments.

This investigation showed that conservation tillage and direct drilling do not necessarily limit nutrient supply of crops compared to mouldboard ploughing. On the contrary, higher humus and nutrient concentrations found in the upper topsoil of several sites may indicate enhanced soil fertility and, moreover, improved conditions for plant growth with conservation tillage. Obviously, yield reduction in WSY going along with reduced tillage is caused by alterations of soil properties other than nutrient status.

In contrast the investigation of soil structural parameters showed major differences between tillage systems. Decreasing tillage depth increased penetration resistance (PR)

and dry bulk density (DBD), and diminished air filled pore volume (AFPV) in the topsoil down to 0.27 m depth, respectively. Several soil structural parameters were closely correlated with each other, and especially to WSY. Variation of single parameters explained up to 60 % of WSY variance attributed to tillage. Combining DBD from 0.03-0.07m depth, average PR from 0.03-0.27 m and AFPV from 0.03-0.18 m soil depth explained 77 % of the tillage effect. Nevertheless, multi-collinearity of soil physical parameters gave no clear evidence on cause and effect.

Conclusively, this investigation clearly showed that conservation tillage systems may result in higher net margins. The production of winter wheat is even successful with no tillage but soil structure degradation due to direct drilling reduces WSY. Thus, sugar beet grown on loessial soils require mechanical loosening down to 0.15-0.20 m depth to produce high WSY and to obtain acceptable net margins. With regard to changing overall production conditions, especially raising production costs, conservation tillage can help maximizing net margins.

## Publikationen

Folgende Manuskripte der vorliegenden Dissertation sind bereits publiziert oder für eine Publikation eingereicht:

DIECKMANN, J., MILLER, H. & KOCH, H.-J., 2006: Rübenwachstum und Bodenstruktur - Ergebnisse aus dem Gemeinschaftsprojekt Bodenbearbeitung. Zuckerindustrie 131, 642-654.

DIECKMANN, J. & KOCH, H.-J., 2008: Einfluss langjährig differenzierter Bodenbearbeitung auf chemische Bodeneigenschaften und Zuckerrübenenertrag. Pflanzenbauwissenschaften 12, 22-31.

DIECKMANN, J., KOCH, H.-J., BÜCHSE, A. & MÄRLÄNDER, B., 2008 a: Yield decrease of sugar beet caused by reduced tillage and direct drilling is related to plant population and soil structure. Journal of Agronomy and Crop Science (eingereicht).

DIECKMANN, J., MILLER, H. & MÄRLÄNDER, B., 2008 b: Mulchsaat auch bei veränderten Preisen und Kosten attraktiv. Die Zuckerrübenzeitung 4, 14.

## Inhaltsverzeichnis

I	Prolog .....	10
	Einleitung .....	10
	Definition und pflanzenbauliche Konsequenzen .....	11
	Die Versuchsanlage .....	15
	Bisherige Untersuchungen.....	15
	Problemstellung .....	17
II	Rübenwachstum und Bodenstruktur - Ergebnisse aus dem Gemeinschafts- projekt Bodenbearbeitung .....	22
	Zusammenfassung.....	22
	1    Einleitung .....	24
	2    Material und Methoden .....	25
	2.1  Versuchsanlage und -durchführung.....	25
	2.2  Pflanzen- und Bodenparameter .....	28
	2.3  Ökonomische Berechnungen .....	32
	2.4  Statistische Auswertung .....	33
	3    Ergebnisse .....	34
	3.1  Ertrag, Qualität und Rentabilität von Winterweizen .....	34
	3.2  Ertrag, Qualität und Rentabilität von Zuckerrüben .....	35
	3.3  Ertrag von Zuckerrübe in Abhängigkeit von der Bodenstruktur.....	37
	4    Diskussion.....	43
	4.1  Ertrag, Qualität und Rentabilität von Winterweizen .....	44
	4.2  Ertrag, Qualität und Rentabilität von Zuckerrüben .....	46
	4.3  Ertrag von Zuckerrübe in Abhängigkeit von der Bodenstruktur.....	48
	4.4  Schlussfolgerungen .....	54
	5    Literatur.....	56
III	Einfluss langjährig differenzierter Bodenbearbeitung auf chemische Boden- eigenschaften und Zuckerrübenenertrag .....	61
	Zusammenfassung.....	61
	1    Einleitung .....	63
	2    Material und Methoden .....	65
	2.1  Standorte und Bodenbearbeitung.....	65
	2.2  Pflanzenbauliche Maßnahmen .....	67
	2.3  Chemische Bodenuntersuchung.....	68
	2.4  Ernte und Qualitätsanalyse.....	70
	2.5  Statistische Auswertung .....	70



---

3	Ergebnisse .....	71
3.1	Texturanalyse .....	71
3.2	Ertrag .....	72
3.3	C <sub>org</sub> , N <sub>t</sub> und C <sub>org</sub> /N <sub>t</sub> -Verhältnis .....	73
3.4	pH-Wert.....	76
3.5	Magnesium .....	76
3.6	Phosphor.....	76
3.7	Kalium .....	77
3.8	Korrelationen zwischen Nährstoffgehalt und Ertrag .....	77
4	Diskussion.....	78
4.1	C <sub>org</sub> , N <sub>t</sub> und C <sub>org</sub> /N <sub>t</sub> -Verhältnis .....	79
4.2	pH-Wert, Phosphor, Kalium und Magnesium .....	81
4.3	Schlussfolgerungen .....	83
5	Literatur.....	85
IV	Yield decrease of sugar beet caused by reduced tillage and direct drilling is related to plant population and soil structure .....	90
	Abstract .....	90
1	Introduction .....	91
2	Material and Methods .....	94
2.1	Experimental sites and treatments .....	94
2.2	Crop management .....	95
2.3	Soil physical investigations .....	96
2.4	Sugar beet yield and quality assessment .....	97
2.5	Statistical Evaluation.....	98
3	Results .....	100
4	Discussion.....	106
5	References.....	113
V	Epilog.....	118
	Einleitung .....	118
	Methodischer Ansatz.....	119
	Ergebnisse .....	121
	Fazit .....	128
VI	Literatur.....	132
VII	Danksagung.....	136
VIII	Lebenslauf .....	138

# I Prolog

## Einleitung

Die Pedogenese ist ein langwieriger Prozess. Aus diesem Grund wird Boden durch seine lange Entwicklungsdauer als nicht erneuerbare Ressource eingestuft. In terrestrischen Ökosystemen ist der Boden von elementarer Bedeutung. Neben der Funktion als Pflanzenstandort und Lebensraum für Bodenorganismen erfüllt er zahlreiche weitere Aufgaben, wie z.B. eine Regelungsfunktion für Wasser und Stoffkreisläufe, die unter anderem die Pufferung, Filterung und Transformation stofflicher Einwirkungen beinhaltet (BRUNOTTE, 2007). Ein intakter Boden ist die Grundlage einer nachhaltigen Pflanzenproduktion, die sowohl heute als auch in Zukunft hohe Erträge und Qualitäten ermöglicht (GISI et al., 1997).

Daraus ergibt sich ein besonderes Interesse der Landwirtschaft, den Produktionsfaktor Boden zu schützen und dessen Fruchtbarkeit bzw. Ertragsfähigkeit zu erhalten. Im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung müssen neben den ökonomischen auch ökologische und soziale Bedürfnisse unserer Gesellschaft berücksichtigt werden, ohne die Entwicklungschancen künftiger Generationen zu beeinträchtigen (WCED, 1987). Somit muss ein stabiles Einkommen der Landwirtschaft mit der umweltschonenden Produktion qualitativ hochwertiger und sicherer Lebensmittel bei gleichzeitiger Ressourcenschonung im Einklang stehen. Um die ökologischen Funktionen des Bodens zu erhalten, wurden entsprechende Forderungen für den Produktionsfaktor Boden im Bundesbodenschutzgesetz (BBodSchG, 1998) festgeschrieben. Die landwirtschaftliche Bodennutzung ist dabei in § 17 „Gute fachliche Praxis in der Landwirtschaft“ geregelt,

der beinhaltet, dass

- die Bodenbearbeitung standortangepasst erfolgen soll
- die Bodenstruktur erhalten oder verbessert werden soll
- Bodenverdichtungen und Bodenabträge möglichst vermieden werden sollen
- die naturbetonten Strukturelemente der Feldflur erhalten werden sollen
- biologische Aktivität des Bodens gefördert werden soll
- der standorttypische Humusgehalt des Bodens erhalten werden soll.

Der Bodenbearbeitung kommt zur Einhaltung dieser Sachverhalte im Sinne der Vorsorgepflicht nach § 7 BBodSchG eine große Bedeutung zu. Daher ist sie Gegenstand der folgenden Untersuchungen in Versuchen mit 12-jährig differenzierten Bodenbearbeitungsverfahren in einer Zuckerrüben - Getreide - Fruchtfolge. Im Mittelpunkt stand die Bedeutung der Bodenstruktur, insbesondere chemischer und physikalischer Parameter, für den Ertrag von Zuckerrüben. Abschließend komplettiert eine ökonomische Bewertung diese Untersuchungen.

### **Definition und pflanzenbauliche Konsequenzen**

Nach KTBL (1993) unterscheidet die moderne Landwirtschaft zwischen konventioneller Bodenbearbeitung, die durch den Einsatz des Wendepfluges auf Krumentiefe geprägt ist, und pflugloser Bodenbearbeitung. Bei pflugloser Bodenbearbeitung wird zusätzlich noch zwischen konservierender Bodenbearbeitung und dem vollständigen Verzicht auf Bodenbearbeitung (Direktsaat) differenziert. Konservierende Bodenbearbeitung ist definiert als mischende, lockernde Bodenbearbeitung ohne den Einsatz des Wendepfluges, im Folgenden als reduzierte Bodenbearbeitung definiert. Dabei kann die Eingriffsintensität ( $\pm$ Bearbeitungstiefe) variieren, wobei nach konservierender Bodenbearbeitung immer ein

Bodenbedeckungsgrad mit Rückständen der Vorfrucht von mehr als 30 % angestrebt wird (CTIC, 1996, zitiert in LINDSTROM & ARCHER, 2003).

Aufbauend auf den Anforderungen des BBodSchG müssen deutsche Landwirte für den vollen Direktzahlungsanspruch neben den direkten Prämienvoraussetzungen die Vorgaben von Cross Compliance (Direktzahlungen-Verpflichtungen-Verordnung) erfüllen. Diese geben vor, dass Ackerflächen in einem guten landwirtschaftlichen und ökologischen Zustand erhalten werden müssen. In diesem Zusammenhang wird Erosionsvermeidung als wichtiger Eckpunkt genannt. Weltweit sind etwa 15 % der Landoberfläche degradiert, wobei ca. ein Drittel durch Winderosion und zwei Drittel durch Wassererosion verursacht wurden. Auch in Europa nimmt die Wassererosion an der Bodendegradierung einen Anteil von mehr als 50 % ein (BOARDMANN, 1990, OLDMANN et al., 1991, FRIELINGHAUS & BORK, 1999). Besonders gefährdet ist der Mittelmeerraum aber auch zahlreiche Regionen Nord- und Mitteleuropas. Auch in Deutschland besteht vielerorts ein großes Erosionsrisiko, wenn mehrere Risikofaktoren (hoher Schluffgehalt, Hangneigung, ungünstige Niederschlagsverteilung) zusammentreffen (WEGENER, 2001).

Um das Auftreten von Erosion zu vermeiden, sollen nach Cross Compliance im Zeitraum vom 1. Dezember bis 15. Februar mindestens 40 % der Ackerfläche bewachsen, bestellt oder zumindest nach Ernte der Vorfrucht nicht gepflügt werden. Doch nicht nur die Wintermonate sind bei der Erosionsvermeidung als besonders kritisch anzusehen. Speziell beim Anbau von Reihenkulturen wie der Zuckerrübe ist der Boden zwischen Saatbettbereitung und früher Jugendentwicklung bis hin zum Reihenschluss als besonders sensibel hinsichtlich der Erosionsanfälligkeit einzustufen (SCHOLZ et al., 2007). Wird diese Frucht auf Lössböden in Hanglagen angebaut, können erosive Niederschläge im Jugendstadium enorme Erosionsschäden verursachen (DIECKMANN et al., 2004, BRUNOTTE, 2007). Die ökologischen Leistungen pflugloser Bodenbearbeitungssysteme als ein schnell umsetzbarer Baustein zur Vorsorge gegen Bodenerosion und –verdichtung sind dabei

unumstritten und das Interesse an derartigen Verfahren steigt (SOMMER, 1998, BMVEL, 2001).

In Deutschland werden Zuckerrüben in besonders erosionsgefährdeten Regionen bereits überwiegend pfluglos angebaut. Dabei gibt es unterschiedliche Varianten, die sich sowohl in der Eingriffsintensität als auch der Mulchauflage (Ernte- und/oder Zwischenfruchtrückstände) unterscheiden. Die Mulchauflage wirkt sich schützend auf die Bodenoberfläche aus, so dass Verschlämmungen und Verkrustungen weniger häufig auftreten und dadurch Erosionsereignisse in ihrem Ausmaß reduziert werden können (PEKRUN & CLAUPEIN, 1998, FRIELINGHAUS et al., 2001).

Neben Erosionsminderung kann pfluglose Bodenbearbeitung positiv auf die Bodenstruktur wirken und die Tragfähigkeit verbessern. Der Einsatz des Wendepfluges kann zu einer Überlockerung der Krume führen. Im Gegensatz zur Bearbeitung mit dem Pflug führt konservierende Bodenbearbeitung zu einer natürlich dichteren Lagerung des nicht mehr bearbeiteten Teils der Krume (STOCKFISCH et al., 1999). Dadurch kann die Tragfähigkeit verbessert und die Druckverlagerung in den Unterboden bei Befahrung mit schweren Maschinen reduziert werden (BRUNOTTE et al., 2000, VAN DER VEER et al., 2005). Allerdings gibt es nur wenige Untersuchungen zu diesem Thema und dabei wurden oftmals keine dem Stand der Technik entsprechenden, oder aber auch überhaupt keine landwirtschaftlichen Maschinen verwendet (EHLERS et al., 2000; HEINONEN et al., 2002). Insgesamt können unterschiedliche Bodenbearbeitungsverfahren langfristig pflanzenbaulich sowie ökologisch relevante Funktionen und damit die Bodenfruchtbarkeit in hohem Maße beeinflussen. (BAEUMER, 1994, DÍAZ-ZORITA & GROVE, 2002, TENHOLTERN, 2000).

Trotz zahlreicher Vorteile pflugloser Bodenbearbeitungsverfahren herrscht in der landwirtschaftlichen Praxis in einigen Bereichen dennoch Skepsis zur Anwendbarkeit dieser Verfahren. Pfluglose Bodenbearbeitung ist zwar ein wirkungsvoller Schutz vor

Erosion, kann sich aber bei bestimmten Kulturen negativ auf den Aufgang und das Pflanzenwachstum auswirken (BRUNOTTE, 1991). Weiterhin wird mit pflugloser Bodenbearbeitung oftmals ein steigender Unkrautdruck, ein verstärktes Auftreten von Pflanzenkrankheiten und Schädlingen wie Schnecken und Mäusen und daraus resultierend weit erhöhten Aufwendungen an Pflanzenschutzmitteln verbunden (PRINGAS, 2005).

Eine Veränderung der Eingriffsintensität der Bodenbearbeitung zieht direkte und indirekte Wirkungen im System Boden/Pflanze nach sich (PEKRUN, 2003), die neben der Bodenbearbeitung auch von den jeweiligen Standorteigenschaften, dem Bodenzustand und der Bewirtschaftung des Schlages, sowie der jeweiligen Konstellation von Bodenzustand, Witterungsverlauf und Pflanzenentwicklung abhängen (RICHTER, 1995). Zwischen der Bodenbearbeitung und den Standortbedingungen gibt es starke Wechselbeziehungen, so dass nicht in jedem Jahr für ein bestimmtes System nur Vor- oder nur Nachteile resultieren (BAEUMER, 1985, CARTER, 1994). Für die Ableitung allgemeingültiger Aussagen sind Versuche Voraussetzung, die eine möglichst große Variabilität an Standorten und Untersuchungsparametern beinhalten. Grundlage bisheriger Versuche bildeten bisher nahezu ausschließlich Parzellenversuche mit geringem Flächenumfang je Einzelparzelle. Dadurch ist die Versuchsdurchführung auf den Einsatz spezieller Versuchstechnik beschränkt und ermöglicht damit keine umfassende pflanzenbauliche und letztlich ökonomische Bewertung, die angemessen auf die Bedingungen in der landwirtschaftlichen Praxis übertragbar ist. Dazu ist es zwingend notwendig, praxisübliche Maschinen einzusetzen. Schließlich können langfristige Auswirkungen dauerhaft pflugloser Bodenbearbeitungsverfahren auf pflanzenbauliche, ökonomische und ökologische Kenngrößen nur in Dauerversuchen unter langjährig differenzierten Standort- und Witterungsbedingungen untersucht werden.

## **Die Versuchsanlage**

Vor diesem Hintergrund werden seit Beginn der 90er Jahre im Gemeinschaftsprojekt Bodenbearbeitung (Südzucker AG & Institut für Zuckerrübenforschung) die Auswirkungen pflugloser Bodenbearbeitung in einer Zuckerrüben - Getreide - Fruchtfolge geprüft. Die Versuche wurden auf 10 landwirtschaftlichen Großbetrieben der Südzucker AG in typischen Ackerbauregionen Süd- und Ostdeutschlands angelegt. Dabei wurden neben dem konventionellen Verfahren Pflug mit jährlich wendender Bodenbearbeitung zwei konservierend bearbeitete Verfahren mit flacher (10 cm, Verfahren Mulch) und tiefer (20 cm, Verfahren Locker) Bodenlockerung und einem Verfahren mit Verzicht auf Bodenbearbeitung (Direktsaat) geprüft. An jedem Standort wurde ein möglichst homogener Schlag in 4 gleich große Parzellen mit 2,5 bis 8 ha aufgeteilt. Die Bewirtschaftung der Parzellen mit Praxismaschinen und die daraus resultierenden Anforderungen an die Versuchsdurchführung und -betreuung erlaubte innerhalb eines Standortes keine Anlage von Wiederholungen und somit keine belastbare Interpretation pflanzenbaulicher Parameter an einem Standort in einem Jahr. Für die statistische Verrechnung wurden die Einzelstandorte als Wiederholung betrachtet. Somit wird die Versuchsanlage sowohl wissenschaftlichem Anspruch gerecht und liefert zugleich eine fundierte Datengrundlage für Handlungsempfehlungen für die Praxis. Insgesamt umfasst die Anlage weit mehr als 200 ha Versuchsfläche bei einer sehr hohen räumlichen Variabilität von Standort und Witterungsparametern und ist somit einzigartig.

## **Bisherige Untersuchungen**

In den ersten 3 Jahren der Versuchsdurchführung zwischen 1994 und 1996 wurden von BECKER (1997) die Auswirkungen differenzierter Bodenbearbeitung auf pflanzenbauliche und ökonomische Parameter untersucht. Nach einer kurzen Umstellungsphase konnten dabei in den konservierend bearbeiteten Verfahren bereits ähnlich hohe Erträge wie in dem

konventionellen Verfahren Pflug erzielt werden. Der vollständige Verzicht auf Bodenbearbeitung im Verfahren Direktsaat führte in allen betrachteten Kulturen zu deutlichen Mindererträgen. Einsparungen an variablen Kosten führten bei einer Gesamtbetrachtung der Rotation zu einem leicht erhöhten Deckungsbeitrag bei pflugloser Bodenbearbeitung gegenüber dem Verfahren Pflug. Die hohen Mindererträge im Verfahren Direktsaat konnten durch die Senkung der Produktionskosten nicht kompensiert werden und führten zu deutlich niedrigeren Deckungsbeiträgen.

Im zweiten Projektabschnitt stand die Wirkung differenzierter Bodenbearbeitung auf ökologische Aspekte (Bodenerosion, Energiebilanz) im Mittelpunkt (WEGENER, 2001). Mit Hilfe einer modellgestützten Erosionssimulation wurde der Anbau von Zuckerrüben in den differenziert bearbeiteten Verfahren hinsichtlich des Feststoffaustrages geprüft. Dieser konnte bei pflugloser Bodenbearbeitung und Direktsaat nahezu vollständig reduziert werden. Der Energieertrag der gesamten Rotation (Senf - Zuckerrüben - Winterweizen - Winterweizen) sank mit abnehmender Eingriffsintensität. Ein ebenfalls sinkender Primärenergiebedarf zur Produktion führte zu einer teilweisen Kompensation des Verlustes an Energieertrag, so dass die energieeffizienteste Produktion im Verfahren Mulch mit flacher Bodenbearbeitung erreicht wurde.

Die Untersuchungen im dritten Projektabschnitt widmeten sich schwerpunktmäßig dem Auftreten von Krankheiten und Schädlingen bei langjährig differenzierter Bodenbearbeitung (PRINGAS, 2005). Dabei stiegen mit abnehmender Eingriffsintensität der Unkrautdruck, der Besatz an Schnecken und Mäusen sowie der Mykotoxingehalt im Korn. Leicht erhöhte Aufwandmengen an Herbiziden, Molluskiziden und Rodentiziden führten wegen gleichzeitig geringeren Kosten der Bodenbearbeitung nicht zu geringerer Rentabilität. Durch Verwendung gering anfälliger Weizensorten und einer gezielten Fungizidstrategie konnten



die Grenzwerte für die Mykotoxingehalte auch bei pflugloser Bewirtschaftungsweise eingehalten werden.

### **Problemstellung**

Da die Aussagekraft von Bodenbearbeitungsversuchen hinsichtlich langfristiger Effekte mit zunehmender Versuchsdauer steigt, wurden die von BECKER (1997) begonnenen pflanzenbaulichen Auswertungen auch in den Folgejahren fortgeführt. Nach den ersten drei Rotationen zeigte sich, dass mit pflugloser Bodenbearbeitung im Getreide annähernd gleiche Erträge wie bei konventioneller Bodenbearbeitung erzielt werden konnten. Beim vollständigen Verzicht auf Bodenbearbeitung trat im Getreide anfangs ein leichter Minderertrag von etwa 5 % auf. In Zuckerrüben war der Ertragsabfall von den bearbeiteten Verfahren zum Verfahren Direktsaat mit etwa 15 % noch deutlicher (PRINGAS, 2005). Die Erforschung dieses hohen Ertragsabfalls beim Anbau von Zuckerrüben im Verfahren Direktsaat war Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

Während für den Anbau von Wintergetreide pfluglose Bodenbearbeitungsverfahren optimiert und etabliert sind (EPPERLEIN, 2001), beschreiben auch andere Autoren für den pfluglosen Anbau von Zuckerrüben Mindererträge (HOFFMANN, 1997, AHL et al., 1998, HEUER et al., 2006, TOMANOVA et al., 2006). Dabei führt vor allem der vollständige Verzicht auf Bodenbearbeitung (Direktsaat) häufig zu einem deutlichen Ertragsverlust gegenüber einer Bearbeitung mit dem Pflug (WALDORF & SCHULZE, 2003). Eine offensichtliche Ursache für den Ertragsrückgang bei Lockerungsverzicht waren im vorliegenden Versuch Probleme mit der Bestandesetablierung bei großen Mengen organischen Materials an der Bodenoberfläche. Ähnliche Beobachtungen machten auch RICHARD et al. (1995). Aber auch bei hoher Bestandesdichte wurde in Direktsaat oftmals ein Ertragsabfall beobachtet. Morphologische Veränderungen am Rübenkörper ließen dabei auf schlechtere

Wachstumsbedingungen der Zuckerrüben bei Lockerungsverzicht schließen. Eine mögliche Ursache für Mindererträge von pfluglos bestellten Zuckerrüben kann bei nahezu vollständigem Verzicht auf Lockerung das Über- bzw. Unterschreiten der für das Pflanzenwachstum optimalen Lagerungsdichte bzw. des Porenvolumen sein (HARRACH & VORDERBRÜGGE, 1991). Dabei haben Autoren, die sich bislang mit dem Einfluss der Bodenstruktur auf das Wachstum von Zuckerrüben befasst haben, unterschiedliche Ansätze zur Wirkungsweise von Strukturunterschieden erarbeitet. DRAYCOTT et al. (1970), CZERATZKI (1972) und JAGGARD (1977) sahen die Ursache für ein vermindertes Pflanzenwachstum in einem erhöhten Bodenwiderstand, der durch einen erhöhten Eindringwiderstand und eine erhöhte Trockenrohdichte direkt auf das Wurzelwachstum wirkt. Dagegen vermuteten MAIDL et al. (1982) die Ursache für Wachstumsunterschiede in einer unterschiedlichen Porosität des Bodens, die über eine unterschiedliche N-Aufnahme infolge einer veränderten Mineralisation auf das Rübenwachstum wirkt. Auch in neueren Untersuchungen konnte das Zusammenwirken zahlreicher Kenngrößen der Bodenstruktur auf den Zuckerrübenenertrag bei unterschiedlicher Primärbodenbearbeitung nicht geklärt werden (LIEBHARD 1997). Neben Veränderungen der Bodenstruktur können aber auch chemische und biologische Veränderungen im Boden aufgrund differenzierter Bewirtschaftung das Pflanzenwachstum beeinflussen (PEKRUN 2003).

Um die Ursachen für Mindererträge bei reduzierter Bodenbearbeitung zu spezifizieren wurden von 2003 bis 2005 detaillierte Untersuchungen zum Einfluss physikalischer und chemischer Kenngrößen des Bodens auf den Ertrag von Zuckerrüben durchgeführt. Zur Überprüfung der Hypothese, dass Bodenbearbeitung über den Effekt unterschiedlicher Bestandesdichten hinaus einen Einfluss auf den Ertrag hatte, wurden Versuche gezielt bei einheitlichen Bestandesdichten in die Versuchsanlage integriert. Aufgrund des hohen Arbeitszeitbedarfs für die Handernte, Bodenprobennahme (Stechzylinder, Bohrstock) und

Analyse der Stechzylinder wurden die Untersuchungen auf die Verfahren Pflug, Mulch und Direktsaat an 6 ausgewählten Standorten beschränkt.

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt im Rahmen einer kumulativen Dissertation auf Grundlage einer Publikation einschließlich Vortrag zur Göttinger Zuckerrübenagung 2006 (1), sowie zwei weiteren Beiträgen, die in wissenschaftlichen Journalen bereits erschienen (2) bzw. eingereicht sind (3). Zudem wurde ein praxisbezogener Beitrag zur Rentabilität verfasst, der diese Arbeit als Epilog abschließt und als eigenständiger Artikel (4) veröffentlicht wurde.

Im **Artikel 1** (DIECKMANN et al., 2006) wurden die Auswirkungen langjährig differenzierter Bodenbearbeitung auf pflanzenbauliche und ökonomische Parameter bei Zuckerrübe und Winterweizen untersucht. Der Ertrag im Verfahren Direktsaat war beim Anbau von Getreide leicht (4 %) und bei der Zuckerrübe erheblich (15 %) niedriger als in den Varianten Pflug und Mulch. Daraus ergab sich eine ebenfalls deutlich geringere Marktleistung in Direktsaat. Diese konnte bei Getreide durch niedrigere Produktionskosten vollständig kompensiert werden und führte zu einem ähnlichen Vergleichsdeckungsbeitrag in allen pfluglos bearbeiteten Varianten. Beim Anbau von Zuckerrüben unterschieden sich die Produktionskosten in den Bodenbearbeitungsverfahren nur gering, so dass die deutlich niedrigere Marktleistung in Direktsaat auch zu einem niedrigeren Vergleichsdeckungsbeitrag führte. Um die Ursache von Mindererträgen im Verfahren Direktsaat zu erforschen, wurden Zusammenhänge zwischen „Rübenwachstum und Bodenstruktur“ mittels Regressionsanalyse untersucht. Eindringwiderstand und Trockenrohdichte nahmen insbesondere in der Oberkrume und der ehemals bearbeiteten Mittelkrume mit abnehmender Eingriffsintensität zu. Weiterhin war bei pflugloser Bodenbearbeitung die Luftkapazität vermindert. Die

Beziehung zwischen dem Bereinigten Zuckerertrag und Trockenrohddichte, Eindringwiderstand und Luftkapazität erklärte bis zu einem Drittel der Ertragsvariation.

Eine detaillierte Betrachtung der Veränderung chemischer Bodenparameter in Abhängigkeit der Bodenbearbeitung erfolgte im **Artikel 2** (DIECKMANN & KOCH, 2008). Abnehmende Eingriffsintensität vom Verfahren Pflug (25-30 cm tief) über Mulch (10-15 cm tief) bis hin zur Direktsaat führte zu einer Anreicherung von organischem Kohlenstoff ( $C_{org}$ ) und Gesamtstickstoff ( $N_t$ ) sowie einem Anstieg des  $C_{org}/N_t$ -Verhältnisses in der Oberkrume. Der Gehalt an pflanzenverfügbarem Magnesium wurde nicht von der Bodenbearbeitung beeinflusst, während bei Phosphor und Kalium eine Anreicherung in der Oberkrume wie bei  $C_{org}$  und  $N_t$  beobachtet wurde. Eine geringfügige Abreicherung im unteren Abschnitt der Krume bei pflugloser Bodenbearbeitung trat nur bei Kalium auf. Insgesamt belegen die Untersuchungen, dass der Verzicht auf wendende Bodenbearbeitung nicht zwangsläufig zu einer eingeschränkten Nährstoffversorgung führt. In den meisten Umwelten wurde mit den erhöhten Humusgehalten sowie geringfügig höheren Nährstoffgehalten in der Oberkrume des Bodens auf diese Parameter der Bodenfruchtbarkeit sogar ein positiver Effekt des Pflugverzichts beobachtet, der sich förderlich auf das Pflanzenwachstum auswirken dürfte. Ein steigender Bereinigter Zuckerertrag konnte in diesem Zusammenhang allerdings nicht gemessen werden, da vermutlich der negative Einfluss anderer Bodenfruchtbarkeitskennziffern die verbesserte Nährstoffversorgung überlagerte.

Da bodenbearbeitungsbedingte Unterschiede der Nährstoffversorgung als Ursache für Ertragsunterschiede weitgehend ausgeschlossen werden konnten, wurden im **Artikel 3** (DIECKMANN et al., 2008 a) nochmals Unterschiede physikalischer Parameter der Bodenstruktur hinsichtlich ihrer Wirkung auf bzw. ihres Anteils am Ertragsunterschied spezifisch analysiert. Dazu wurden die Ertragsergebnisse der Kleinparzellen zusätzlich zum

Standorteffekt (Grundlage des ersten Artikels) auch um den Effekt unterschiedlicher Bestandesdichten bereinigt. Die Korrelation zwischen Bereinigtem Zuckerertrag und Eindringwiderstand, Lagerungsdichte und Luftkapazität konnte so nochmals erhöht werden. Mittels Spearman`s Korrelationsmatrix konnte nicht nur die enge Beziehung der untersuchten Parameter der Bodenstruktur zum Ertrag, sondern auch die hohe Korrelation der Parameter untereinander (Multikolarität) nachgewiesen werden. Diese verdeutlichte, dass für eine abschließende Beurteilung des genauen Wirkungsmechanismus der Bodenstruktur auf den Ertrag von Zuckerrüben weitere Untersuchungen erforderlich sind. Dennoch konnte über die Kombination der Parameter aus ausgewählten Tiefenbereichen bis zu 77 % der bearbeitungsbedingten Ertragsvariation erklärt werden.

Im abschließenden **Epilog**, der in gekürzter Version als **Artikel 4** (DIECKMANN et al. 2008 b) in einer praxisorientierten Zeitung erschienen ist, erfolgte eine ökonomische Auswertung für den Anbau von Zuckerrübe und Winterweizen, getrennt in Rübenweizen und Stoppelweizen, sowie für die gesamte Rotation. Weiterhin wurde die Rentabilität der Kulturen in Abhängigkeit der Bodenbearbeitungsverfahren unter differenzierten Erlös-Kostensituationen betrachtet. Bei gleichem Ertrag in den Verfahren Locker und Mulch bzw. 4 % geringerem Ertrag im Verfahren Direktsaat gegenüber dem Verfahren Pflug sanken beim Anbau von Getreide die Produktionskosten mit abnehmender Eingriffsintensität deutlich. Daraus resultierte der höchste Vergleichsdeckungsbeitrag in den Varianten Mulch und Direktsaat, wobei unter der Annahme steigender Erzeugerpreise das ertragsstärkere Verfahren Mulch wirtschaftlicher war. Die Produktionskosten für Zuckerrüben unterschieden sich nur minimal zwischen den Bodenbearbeitungsvarianten, dies führte zum höchsten Vergleichsdeckungsbeitrag in den Varianten Locker und Mulch. Das Verfahren Direktsaat war durch den hohen Minderertrag von etwa 15 % bei Zuckerrüben selbst bei einer Halbierung des Rübenmindestpreises nicht konkurrenzfähig.

## **Rübenwachstum und Bodenstruktur - Ergebnisse aus dem Gemeinschaftsprojekt Bodenbearbeitung<sup>1</sup>**

### **Beet Growth and Soil Structure - Results from a Long Term On-Farm Joint Research Project**

*Jan Dieckmann, Hermann Miller und Heinz-Josef Koch*

#### **Zusammenfassung**

In einem Großflächenversuch an zehn Lössstandorten in Süd- und Ostdeutschland wurden seit 1994 die Verfahren Pflug, Locker, Mulch und Direktsaat hinsichtlich ihrer Eignung für den Winterweizen- und Zuckerrübenanbau geprüft. In beiden Kulturen wurde mit konservierender Bodenbearbeitung ein ähnlich hoher Ertrag wie bei Pflugbearbeitung erzielt. Lediglich Direktsaat führte beim Anbau von Winterweizen (-4 %) als auch von Zuckerrübe (-15 %) zu Mindererträgen. Der deutlich niedrigere Zuckerrübenenertrag bei Direktsaat konnte durch geringere Produktionskosten nicht kompensiert werden.

Als Ursache für den Ertragsunterschied ergaben Bodenuntersuchungen im Zeitraum 2003-2005 unterschiedliche bearbeitungsspezifische Ausprägungen der Bodenstruktur. Mit abnehmender Bearbeitungsintensität wurde ein Anstieg des Eindringwiderstands und der Trockenrohdichte insbesondere in der Oberkrume und der ehemals bearbeiteten Mittelkrume gemessen. Weiterhin war bei reduzierter Bodenbearbeitung die Luftkapazität vermindert. Die bodenphysikalischen Parameter zeigten eine enge Korrelation mit dem Ertrag der Zuckerrübe.

Die Ergebnisse belegen, dass konservierende Bodenbearbeitung durch geringere Produktionskosten den Deckungsbeitrag erhöhen kann. Eine Degradierung der

---

<sup>1</sup> Dieser Artikel wurde bereits veröffentlicht unter DIECKMANN, J., MILLER, H. & KOCH, H.-J., 2006: Rübenwachstum und Bodenstruktur - Ergebnisse aus dem Gemeinschaftsprojekt Bodenbearbeitung. Zuckerindustrie 131, 642-654.

Bodenstruktur kann beim Anbau von Zuckerrübe allerdings zu erheblichem Minderertrag führen.

**Schlüsselwörter:** reduzierte Bodenbearbeitung, Direktsaat, Bodenstruktur, Eindringwiderstand, Lagerungsdichte, Luftkapazität, nutzbare Feldkapazität, Zuckerrübe, Winterweizen, Ertrag, Rentabilität

### **Summary**

In 1994, a large-scale field trial was established on 10 loessial sites in southern and eastern Germany to compare the effect of different soil tillage systems (ploughing, loosening, mulching, and direct drilling) on yield and economic performance of winter wheat and sugar beet crops.

Winter wheat and sugar beet yield did not significantly differ between the conservation tillage systems (loosening, mulching) and ploughing, whereas, in both crops a yield loss occurred with direct drilling (-4 % winter wheat and -15 % sugar beet). With regard to the net margin, lower production costs obtained with direct drilling compensated for the yield decrease in winter wheat but not in sugar beet.

In 2003-2005 soil structure measurements were conducted. In the upper and medium layers of the topsoil penetration resistance and soil bulk density considerably increased, whereas air capacity diminished with decreasing tillage depth. The soil structural parameters were closely correlated with yield.

This investigation clearly showed, that well adapted conservation tillage systems may result in higher net margins. In contrast, direct drilling of sugar beet may cause substantial yield losses. This was primarily caused by structure degradation in the upper and medium layers of the topsoil.

**Key words:** conservation tillage, direct drilling, soil structure, penetration resistance, soil bulk density, air capacity, useful field capacity, sugar beet, winter wheat, yield, profitability

## 1 Einleitung

Der starke Preisdruck auf eine Vielzahl landwirtschaftlicher Produkte führte in den vergangenen Jahren zu einem erheblichen Strukturwandel in der Landwirtschaft. Die Anzahl der landwirtschaftlichen Betriebe ging stetig zurück, während die verbleibenden Unternehmen immer stärker wuchsen. Mit steigender Betriebsgröße gewinnen kostengünstige, schlagkräftige Produktionsverfahren zunehmend an Bedeutung. Ein ausgeprägtes Kostenmanagement zur Senkung der Produktionskosten soll Einkommensverluste bei sinkenden Produktpreisen kompensieren. Insbesondere im Bereich der kosten- und zeitintensiven Bodenbearbeitung sind durch Rationalisierungsmaßnahmen hohe Einsparpotentiale vorhanden (KÖLLER 1994). Um mit betriebs- und standortspezifisch angepassten Verfahren konservierender Bodenbearbeitung die Produktionskosten zu senken und die Rentabilität zu steigern, ist ein gleich hohes Ertragsniveau wie im konventionellen Anbau Voraussetzung (WEGENER 2001).

Aufgabe der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion ist die Erzeugung qualitativ hochwertiger Nahrungs- und Futtermittel sowie die Gewinnung von Industrierohstoffen (FORSTREUTER 1999). Dabei kommt dem Produktionsfaktor Boden eine besondere Bedeutung zu. Ein intakter Boden ist die Grundlage einer nachhaltigen Pflanzenproduktion, die sowohl heute als auch in Zukunft hohe Erträge und Qualitäten ermöglicht (GISI et al. 1997). Bewirtschaftungsmaßnahmen können langfristig die Bodenfruchtbarkeit verändern (BAEUMER 1994). Im Bundesbodenschutzgesetz (ANONYMUS 1999) sind wesentliche Grundlagen der guten fachlichen Praxis bei der Bodenbewirtschaftung verankert. Dazu gehören u.a. eine standortangepasste, gefügeschonende Bearbeitung sowie die Vermeidung von Bodenerosion und Verdichtung.



Pfluglose Bodenbearbeitungsverfahren haben ein großes Potential, erosive Bodenabträge zu vermindern (DIECKMANN et al. 2004). Weiterhin kann der Verzicht auf eine wendende Bodenbearbeitung die Ausbildung einer tragfähigen Bodenstruktur ermöglichen und so dem Entstehen von Verdichtungen entgegenwirken (SCHJÖNNING & RASMUSSEN 1989). Die Tragfähigkeit und damit der Schutz vor Bodenverdichtung nimmt durch natürliche Aggregierungsprozesse bei Pflugverzicht zu. Allerdings kann bei vollständigem Verzicht auf Lockerung der für das Pflanzenwachstum optimale Lagerungsdichten- und/oder Porenvolumenbereich über- bzw. unterschritten werden. Die so entstehende Schadverdichtung kann zu Mindererträgen führen (HARRACH & VORDERBRÜGGE 1991).

Der vorliegende Beitrag befasst sich mit der Eignung pflugloser Bodenbearbeitungsverfahren mit unterschiedlicher Bearbeitungsintensität hinsichtlich pflanzenbaulicher, ökonomischer und ökologischer Aspekte. Dazu erfolgt zunächst die Quantifizierung der langjährigen Effekte kontinuierlich differenzierter Bodenbearbeitung (jährlich gepflügt bis Direktsaat) auf Ertrag und Rentabilität von Winterweizen und Zuckerrübe. Im zweiten Teil der Arbeit werden die Auswirkungen langjährig differenzierter Bodenbearbeitung auf ausgewählte Kenngrößen der Bodenstruktur (Eindringwiderstand, Trockenrohdichte, Luftkapazität und nutzbare Feldkapazität) beschrieben. Abschließend werden die Beziehungen zwischen den Kenngrößen der Bodenstruktur und dem Ertrag von Zuckerrüben vor dem Hintergrund erheblicher Mindererträge bei Direktsaat quantifiziert.

## **2 Material und Methoden**

### **2.1 Versuchsanlage und -durchführung**

Der Versuch wurde seit 1992 in typischen Ackerbauregionen Süd- und Ostdeutschlands durchgeführt. An jedem der 10 Standorte wurde ein Bodenbearbeitungsversuch als Blockanlage ohne Wiederholung angelegt. Dazu wurde ein möglichst homogener Schlag in vier gleich große Parzellen mit einer Größe zwischen 2,5 und 8 ha unterteilt. Nachdem

Tückelhausen 1999 und Salzmünde 2003 durch das Auslaufen der Pachtung als Versuchsstandorte ausschieden, umfasste die Versuchsserie noch 8 Standorte (Abb. 1).

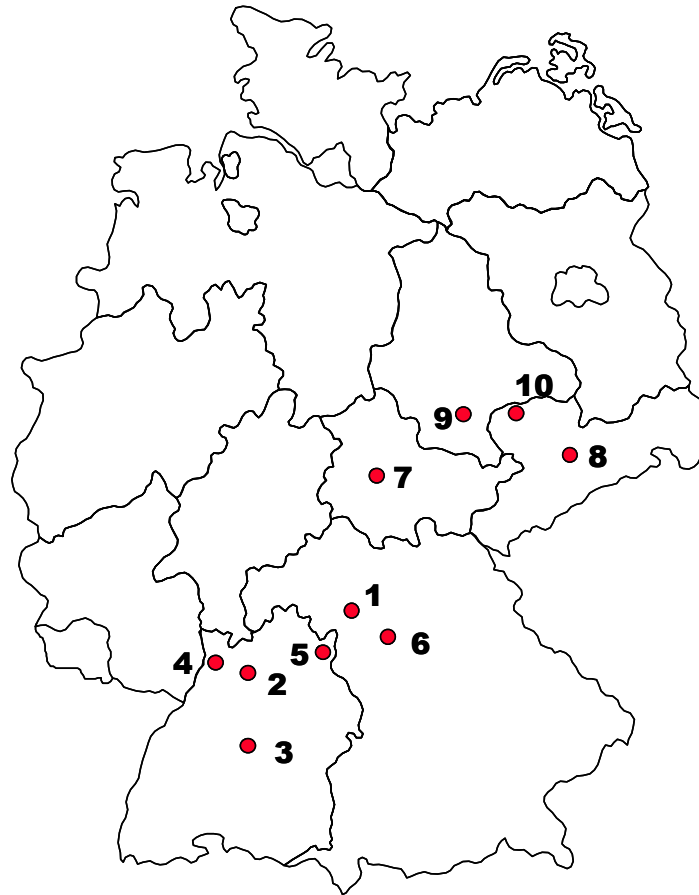


Abb. 1: Versuchsstandorte der Bodenbearbeitungsversuche

Auf diesen mit praxisüblicher Landtechnik bewirtschafteten ortsfesten Großparzellen wurden vier Bodenbearbeitungssysteme verglichen. Neben einer konventionellen Variante Pflug mit einer jährlichen Herbstfurche auf Krumentiefe (25 - 30 cm) wurden die konservierend bearbeiteten Verfahren Locker und Mulch angelegt (Abb. 2). In diesen Verfahren erfolgte keine wendende Bodenbearbeitung, sondern lediglich eine mischende Bodenbearbeitung mit einem Grubber. Dabei wurde das Verfahren Locker jährlich krumentief (25 cm) gelockert. Im Unterschied dazu war die Eingriffsintensität im Verfahren Mulch mit ca. 10 - 15 cm deutlich flacher. Das Verfahren Direktsaat wurde dagegen

zunächst gänzlich ohne Bodenbearbeitung durchgeführt. In den ersten Versuchsjahren misslang jedoch in diesem Verfahren wiederholt die Bestandesetablierung bei Zuckerrüben aufgrund mangelnder Bedeckung des Saatgutes mit feinkrümeligem Boden. Dies führte zu unzureichenden Bestandesdichten. Deshalb wurde ab 1996 im Verfahren Direktsaat eine flache Bodenbearbeitung (max. 3 - 5 cm tief) zur Aussaat der Zuckerrüben eingeführt. Mit diesem Bearbeitungsgang wurde in Verbindung mit einer verminderten Ablageentfernung die Bestandesdichte der Zuckerrüben im Verfahren Direktsaat deutlich erhöht.

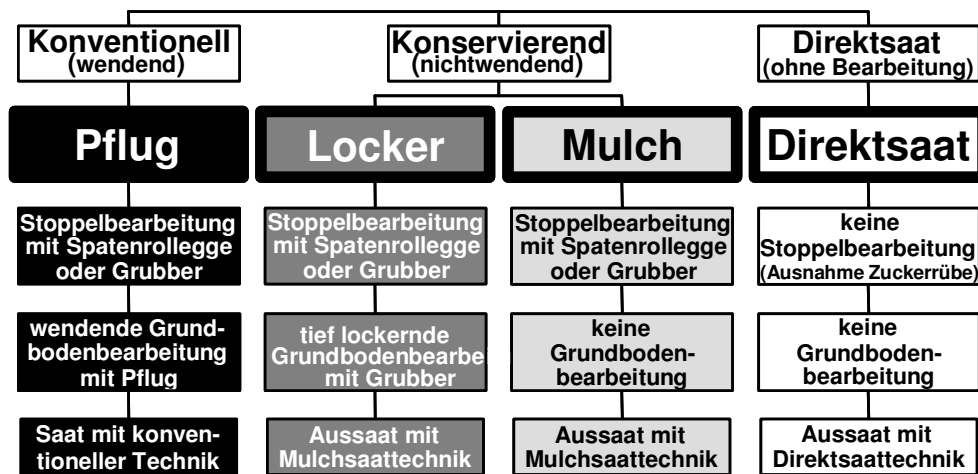


Abb. 2: Bodenbearbeitungsverfahren – Definition & Verfahrensablauf

Die Fruchtfolge auf den Versuchsstandorten war dreifeldrig: Auf Zuckerrüben, die generell nach einer Zwischenfrucht angebaut wurden, folgte ein zweijähriger Anbau von Winterweizen.

Die Bodenbearbeitung wurde mit praxisüblicher Maschinenteknik durchgeführt. Je nach Maschinenausstattung der Betriebe und spezifischer Notwendigkeit in Abhängigkeit vom Bodenzustand wurden auf den Standorten unterschiedliche Geräte zur Stoppelbearbeitung (Spatenrollegge, Scheibenegge oder Schwergrubber) eingesetzt. Bei der Aussaat der Zuckerrüben kamen ausschließlich Einzelkornsäugeräte mit Mulchsaateinrichtung der

Firmen Kleine und Accord zum Einsatz. Das Getreide wurde mit unterschiedlichen Maschinen bestellt. Während in den Verfahren Pflug, Locker und Mulch in der Regel Universaldrillmaschinen zum Einsatz kamen, erfolgte die Aussaat in Direktsaat mit speziellen Direktsaatmaschinen (Firmen John Deere und Amazone).

Die Aussaatstärke wurde an die Bodenbearbeitungsverfahren angepasst. Bei Zuckerrüben wurde im Verfahren Direktsaat die Ablageentfernung gegenüber den anderen Verfahren um 2 cm verringert (in der Regel auf 17 cm), da erfahrungsgemäß ein niedriger Feldaufgang zu erwarten war. Je nach Bedarf wurde seit 2003 auch bei der Direktsaat von Stoppelweizen die Aussaatstärke um 10 % erhöht. Ziel war ein Ausgleich hoher Pflanzenverluste bei extrem hoher Mulchauflage im Verfahren Direktsaat.

Der Pflanzenschutz wurde betriebsüblich nach guter fachlicher Praxis und in den Bearbeitungsvarianten soweit wie möglich einheitlich durchgeführt. Eine verfahrensspezifische Differenzierung wurde im Bedarfsfall beim Einsatz von Herbiziden, Molluskiziden und Rodentiziden vorgenommen.

Grunddüngung und mineralische Stickstoffdüngung erfolgten in Anlehnung an die EUF-Düngeempfehlung einheitlich in allen Bodenbearbeitungsvarianten eines Standortes, wobei die Höhe zu Zuckerrüben zwischen 50 und 145 kg N ha<sup>-1</sup> sowie zu Winterweizen zwischen 125 bis 190 kg N ha<sup>-1</sup> variierte.

## **2.2 Pflanzen- und Bodenparameter**

Die Bestimmung der Bestandesdichte bei Zuckerrüben erfolgte in jedem Verfahren im 4- bis 6-Blattstadium mittels Zählung der Anzahl an Rüben auf 30 diagonal über eine Großparzelle verteilten Zählstrecken von je 12 m Länge (drei nebeneinander liegende Reihen à 4 m). Die Pflanzendichte von Winterweizen wurde ebenfalls an 30 diagonal über eine Großparzelle angeordneten Zählstellen bestimmt. Mit Hilfe eines Zählstabes wurde

hierbei die Anzahl Pflanzen auf einer 0,2 m<sup>2</sup> entsprechenden Fläche (zwei Reihen) im BBCH-Stadium zwischen 13 und 21 ermittelt.

Zur Erfassung des Ertrages wurde aus jedem Bodenbearbeitungsverfahren eine möglichst große Kernparzelle beerntet, deren Größe mit Hilfe eines GPS-Empfängers (Leica GS 510) exakt ausgemessen wurde. Die Beerntung der Zuckerrüben erfolgte mit selbstfahrender sechsreihiger Erntetechnik (Firmen Holmer oder Herriau). Die Rüben der einzelnen Parzellen wurden am Feldrand separat gelagert, vorgereinigt und in eine Zuckerfabrik geliefert. Dort wurden neben dem Gewicht auch die Qualität repräsentativer Teilproben bestimmt. Die Analyse der Parameter der technischen Qualität sowie die Berechnung des Standardmelasseverlustes und des Bereinigten Zuckerertrages erfolgten nach BUCHHOLZ et al. (1995). Getreide wurde mit praxisüblichen Mähdreschern geerntet. Das Erntegut jeder Parzelle wurde separat gewogen und beprobt. Neben der sofortigen Bestimmung der Kornfeuchte wurden Rohproteingehalt und Tausendkornmasse durch das externe Labor Aberham (Großaitingen, Baden-Württemberg) bestimmt.

Tab. 1: Standorteigenschaften in der Krume (3 - 27 cm) im Mittel über die Bodenbearbeitungsverfahren Pflug, Mulch und Direktsaat, Standorte Friemar, Insultheim, Sailtheim, Lüttewitz und Zschortau, 2003 – 2005

Standort	Humus	Textur		
	[%]	Ton [%]	Schluff [%]	Sand [%]
Friemar	2,76	29	68	3
Insultheim	3,66	30	52	18
Sailtheim	1,83	19	78	3
Lüttewitz	2,06	14	83	3
Zschortau	2,05	14	53	33

*signifikante Effekte bei  $\alpha = 5$  (\*), 1 (\*\*)*

Die bodenphysikalischen Untersuchungen erfolgten in den Jahren 2003-2005 an 2 Standorten pro Jahr (Grombach (nicht gewertet, da die Auswirkung eines starken Gewitters im Frühjahr 2003 den Einfluss der Bodenbearbeitung auf den Zuckerrübenenertrag überlagerte) und Friemar 2003, Sailtheim und Insultheim 2004, Lüttewitz und Zschortau 2006) jeweils in den Verfahren Pflug, Mulch und Direktsaat. In Friemar war der vorherrschende Bodentyp ein Braunerde-Tschernosem mit rund 30 % Ton- und 70 % Schluffanteil (Tab. 1). Die Böden in Sailtheim und Lüttewitz waren Parabraunerden mit rund 80 % Schluffgehalt. Der Standort Insultheim wurde mit einem Tongehalt von 30 % und einem Sandanteil von 20 % als Gley-Braunauenboden eingestuft. Der vorherrschende Bodentyp am Standort Zschortau war Parabraunerde-Pseudogley mit 30 % Sandanteil und 15 % Tongehalt.

Um den Einfluss der unterschiedlichen Bodenbearbeitungssysteme auf Kenngrößen der Bodenstruktur erfassen zu können, wurde in jeder Bodenbearbeitungsparzelle eines Standortes ein Messareal von 40 m x 40 m ausgewiesen. Diese Messareale sollten möglichst geringe Unterschiede in ihren bodentypologischen und bodenartlichen Eigenschaften aufweisen. Dabei wurde insbesondere der untersuchte Bereich von 0-45 cm Bodentiefe betrachtet.

Jeweils im Frühjahr (Bodenfeuchte nahe Feldkapazität) wurde an den 6 Standorten der Eindringwiderstand des Bodens mit einem Penetrologger (Firma Eijkelkamp, Giesbeek, NL;

Messspitze 1 cm<sup>2</sup> Fläche bei 60° Anstellwinkel) bis in eine Tiefe von 90 cm gemessen. Jedes Messareal wurde in 4 gleich große Quadranten unterteilt, die mit jeweils 10 Einstichen diagonal über die Fläche beprobt wurden. Nach der Aussaat der Zuckerrüben erfolgte eine vertikale Probenahme von ungestörten Bodenproben (Stechzylinder) aus den Tiefen 3-7 cm und 23-27 cm (100 cm<sup>3</sup>, 50 mm im Durchmesser) sowie 13-18 cm und 38-43 cm (250 cm<sup>3</sup>, 80 mm im Durchmesser) mit 25-30 facher interner Wiederholung von einer Profilgrube (Fläche ca. 2 m<sup>2</sup>) aus, die im mittleren Bereich eines Messareals eingerichtet wurde. Dabei wurden an jeder Profilgrube 3 räumlich getrennte Messstellen jeweils an 3 Rändern der Profilgrube angelegt. Auf diese Messstellen (später als Lagen bezeichnet) wurden die zu entnehmenden Stechzylinder gleichmäßig aufgeteilt. Zusätzlich wurde aus jeder Schicht eine Mischprobe aus gestörtem Boden gezogen.

Bis zur Analyse wurden die Proben kühl und dunkel gelagert. Im Labor wurden die Stechzylinder auf ein Sandbett aufgesetzt, mit H<sub>2</sub>O aufgesättigt und auf einen pF-Wert von 1,8 eingestellt. Nach der Trocknung (24 h bei 105 °C) wurden die Proben erneut gewogen. An zusätzlich entnommenen, gestörten Proben wurden die Textur, die Dichte der festen Bodensubstanz und der Totwassergehalt bestimmt. Aus dem Trockengewicht und dem Volumen des Stechzylinders wurde die Trockenrohddichte berechnet, aus der mit Hilfe der Festsubstanzdichte das Gesamtporenvolumen bestimmt wurde. Die Differenz zwischen dem Gesamtporenvolumen und dem wassergefüllten Porenraum bei pF 1,8 wurde als Luftkapazität definiert.

An den Standorten mit bodenphysikalischen Untersuchungen wurden innerhalb jedes Messareals Parzellen mit unterschiedlicher Bestandesdichte der Zuckerrüben (53.000, 65.000 und 83.000 Pflanzen ha<sup>-1</sup>) durch Vereinzelung von Hand angelegt (einfaktorielle Spaltanlage, 4 Wiederholungen, vollständige Randomisation). Die eingestellten Bestandesdichteunterschiede spiegeln häufig im Feld anzutreffende Pflanzendichten wieder. Dabei wurden nach dem Zufallsprinzip möglichst gleichmäßig Lücken 1. und 2. Ordnung

(innerhalb einer Reihe fehlten maximal 1 bis 2 Pflanzen in Folge) in die Handernteparzellen eingefügt. Diese wurden kurz vor der Großparzellenernte von Hand gerodet (10,8 m<sup>2</sup> pro Parzelle). Am Rübenmaterial wurden analog zu den Rüben der Maschinenernte die Parameter der technischen Qualität bestimmt.

### **2.3 Ökonomische Berechnungen**

Alle durchgeführten Arbeitsgänge wurden mit den dazugehörigen Betriebsmittelaufwendungen in einer separat für jeden Standort und jedes Bodenbearbeitungsverfahren angelegten Ackerschlagkartei dokumentiert. Für die Kalkulation der variablen Verfahrenskosten wurden Betriebsmittel- und Produktpreise des aktuellen Anbaujahres herangezogen.

Die Marktleistung der Zuckerrüben wurde, basierend auf der Bezahlung für 2006 nach neuer Zuckermarktordnung, rückwirkend für die Jahre 1994 –2005 berechnet. Dabei wurde ein Rübenmindestpreis von 32,86 € t<sup>-1</sup> Reine Rüben zu Grunde gelegt. Ausgleichszahlungen wurden nicht berücksichtigt. Weiterhin wurde eine Rübenmarkvergütung von 2,40 € t<sup>-1</sup> Reine Rüben sowie ein Polarisationszuschlag von 0,9 % pro 1/10 Zuckergehalt von 16 - 19 % Zucker und 0,7 % pro 1/10 Zuckergehalt über 19 % Zucker angenommen. Maschinenkosten und Arbeitszeitbedarf wurden auf Grundlage der jeweils aktuellen KTBL-Verrechnungssätze kalkuliert. Für alle Maschinen wurde eine Auslastung an der Abschreibungsschwelle angenommen. Der Lohnanspruch wurde je Arbeitskraftstunde mit 15,32 € bewertet.

Für den ökonomischen Vergleich der Bodenbearbeitungsverfahren wurde eine flächenbezogene Deckungsbeitragsrechnung durchgeführt. In dieser wurden von der Marktleistung die proportionalen Spezialkosten wie Saatgut, Düngung, Pflanzenschutz, variable Maschinenkosten, Lohnmaschinen und der Zinsansatz für das gebundene Umlaufvermögen abgezogen. Von dem Ergebnis dieser Berechnung, dem Deckungsbeitrag I,



wurden dann die festen Maschinenkosten (Abschreibung und Zinsansatz) sowie der Lohnanspruch abgezogen. Daraus errechnete sich der Deckungsbeitrag II (auch Vergleichsdeckungsbeitrag).

Alle Kalkulationen wurden mit Nettopreisen, d. h. ohne Berücksichtigung der gesetzlichen Mehrwertsteuer, durchgeführt.

## **2.4 Statistische Auswertung**

Die statistische Auswertung erfolgte mit dem Softwarepaket SAS (Version 8.1, SAS Inc.). Um Wirkungen der Bodenbearbeitung statistisch zu prüfen, wurden die Einzelversuche (Standort/Jahr) als Wiederholungen betrachtet. Nach Varianzanalyse und F-Test wurde bei signifikanten F-Werten ein Mittelwertvergleich nach Tukey mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $p \leq 5 \%$  durchgeführt.

Die große Anzahl interner Wiederholungen bei der Erhebung der Bodenparameter führte zu einem sehr umfangreichen Datensatz, der von der SAS-Software nicht mehr verrechnet werden konnte. Daher wurden zunächst aus den internen Wiederholungen (pro Tiefe, Lage, Standort und Bodenbearbeitung) Mittelwerte gebildet. Die Messwiederholungen wurden durch die Anwendung eines anisotropen Powermodells berücksichtigt. Standort/Jahr und alle Interaktionen wurden als zufällige Effekte modelliert. Bei der statistischen Auswertung der Wirkung von Bodenbearbeitung und Bestandesdichte auf den Ertrag der Zuckerrübe (Handernte) wurde das Modell einer Spaltanlage verwendet. Standort/Jahr sind dabei voneinander unabhängige Wiederholungen, die Bodenbearbeitung stellt das Großteilstück und die Bestandesdichte innerhalb von Bodenbearbeitung x Standort/Jahr das Kleinteilstück dar. Das Modell wurde mit zufälligen Effekten von Standort/Jahr gerechnet. Abschließend wurden Regressionen zwischen den Bodenparametern und dem Ertrag berechnet.

### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Ertrag, Qualität und Rentabilität von Winterweizen

Zwischen den Bodenbearbeitungsverfahren waren deutliche Unterschiede im Ertragsaufbau zu beobachten: Die Bestandesdichte nahm ausgehend von Pflug mit 241 Pflanzen  $\text{m}^{-2}$  über Locker bis Mulch auf 235 Pflanzen  $\text{m}^{-2}$  leicht ab (Abb. 3). In der Direktsaatvariante war dagegen die Pflanzendichte mit 208 Pflanzen  $\text{m}^{-2}$  signifikant niedriger als in den übrigen Bodenbearbeitungsverfahren. Auch zur Ernte traten noch klare Unterschiede zwischen den Bodenbearbeitungsverfahren auf. Die Ährendichte nahm mit sinkender Bodenbearbeitungsintensität von 495 Ähren  $\text{m}^{-2}$  in Pflug über Locker und Mulch bis zur Direktsaat auf 455 Ähren  $\text{m}^{-2}$  signifikant ab (nicht dargestellt). Demgegenüber nahm die Anzahl Körner  $\text{m}^{-2}$  mit sinkender Intensität der Bodenbearbeitung zu. Das Tausendkorngewicht war in allen Bearbeitungsvarianten gleich.

Im Mittel aller Einzelversuche von 1994 bis 2005 war der Kornertrag des Winterweizens im Verfahren Pflug mit  $7,71 \text{ t ha}^{-1}$  am höchsten (Abb. 3). Während der Kornertrag in den Verfahren Locker und Mulch nur ca.  $0,1 \text{ t ha}^{-1}$  niedriger als im System Pflug war, trat im Verfahren Direktsaat mit  $7,39 \text{ t ha}^{-1}$  ein signifikanter Minderertrag auf.

Der Rohproteingehalt war im Mittel aller Einzelversuche in den Verfahren Locker und Mulch signifikant um ca. 3 % niedriger als im System Pflug. Die Direktsaat wies einen mittleren Wert auf und unterschied sich nicht von den übrigen Varianten.

Die Produktionskosten für Winterweizen nahmen mit der Bearbeitungsintensität deutlich und stets signifikant ab (Abb. 3). Dabei traten bei den Kosten für Düngemittel, Lohnmaschinen und Zinsanspruch nahezu keine Unterschiede auf (nicht dargestellt). Auch die im Bedarfsfall seit 2003 eingeführte 10 %ige Erhöhung der Aussaatstärke beim Stoppelweizen in Direktsaat führte lediglich zu geringfügigen Unterschieden bei den Saat-

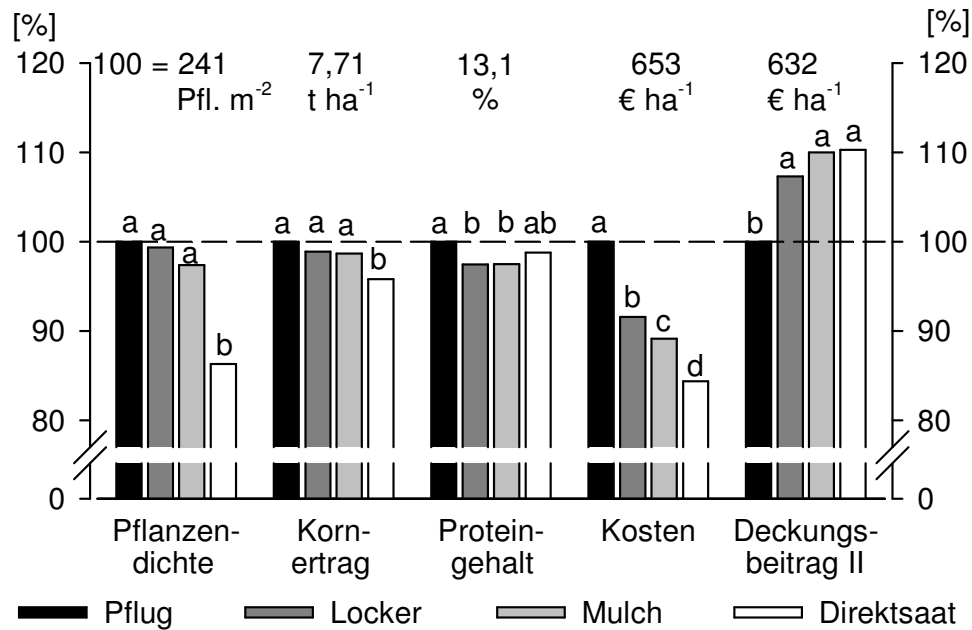


Abb. 3: Einfluss langjährig differenzierter Bodenbearbeitung auf Pflanzendichte, Kornertrag, Proteingehalt und Rentabilität von Winterweizen im Mittel über 10 Standorte und die Jahre 1994 – 2005;  $n = 53$ ; relativ, Pflug = 100, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz ( $p \leq 0,05$ ; Tukey-Test)

gutkosten (Abb. 3). Die Pflanzenschutzmittelkosten stiegen bedingt durch höhere Herbizid- und Insektizidaufwendungen von Pflug zu Direktsaat leicht an.

Demgegenüber bewirkte eine sinkende Intensität der Bodenbearbeitung deutliche Einsparungen bei den variablen und fixen Maschinenkosten. Insgesamt wurden im Verfahren Locker rund  $40 \text{ € ha}^{-1}$ , in Mulch  $55 \text{ € ha}^{-1}$  und in Direktsaat  $100 \text{ € ha}^{-1}$  an Kosten gegenüber dem System Pflug eingespart (Abb. 3). Diese Abnahme der Produktionskosten führte in den Verfahren Direktsaat und Mulch zur Erwirtschaftung der höchsten Vergleichsdeckungsbeiträge.

### 3.2 Ertrag, Qualität und Rentabilität von Zuckerrüben

Bei Zuckerrüben traten in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung deutliche Unterschiede in der Bestandesdichte auf. Im Verfahren Pflug betrug die Bestandesdichte im Mittel über

alle Standorte und Jahre 86.000 Pflanzen ha<sup>-1</sup> (Abb. 4). Eine ca. 5 % geringere Pflanzenzahl wurde in den Verfahren Locker und Mulch mit Pflanzendichten zwischen 82.000 und 83.000 Pflanzen ha<sup>-1</sup> erreicht. Im Verfahren Direktsaat war die Pflanzenzahl mit 72.000 Pflanzen ha<sup>-1</sup> gegenüber den anderen Varianten signifikant niedriger.

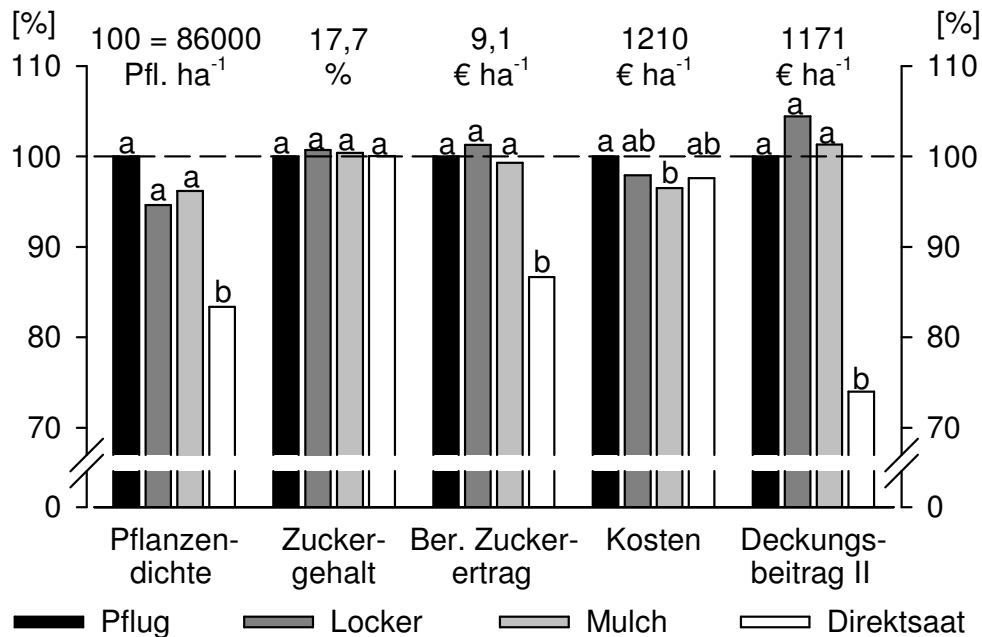


Abb. 4: Einfluss langfristig differenzierter Bodenbearbeitung auf Pflanzendichte, Zuckergehalt, Bereinigten Zuckerertrag und Rentabilität von Zuckerrüben im Mittel über 10 Standorte und die Jahre 1994 – 2005; n = 32; relativ, Pflug = 100, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz ( $p \leq 0,05$ ; Tukey-Test)

Der Zuckergehalt wurde von der Bodenbearbeitung nicht beeinflusst (Abb. 4). Demgegenüber traten signifikante Unterschiede im Rübenertrag und den Gehalten an Melassebildnern auf, die sich wie folgt auf den BZE auswirkten: Im Mittel über die Standorte und Jahre wurden im Verfahren Pflug 9,1 t ha<sup>-1</sup> BZE erwirtschaftet (Abb. 4). Im Verfahren Locker lag der BZE mit 9,2 t ha<sup>-1</sup> 0,1 t über und im Verfahren Mulch mit 9,0 t ha<sup>-1</sup> 0,1 t ha<sup>-1</sup> unter dem BZE der Variante Pflug. Gegenüber diesen sehr geringen Unterschieden im BZE zwischen den Verfahren Pflug, Locker und Mulch traten bei Direktsaat

signifikant geringere Erträge auf: Hier lag der BZE mit  $7,9 \text{ t ha}^{-1}$  ca. 15 % niedriger als im Verfahren Locker mit dem höchsten Ertrag.

Die Bodenbearbeitungsverfahren unterschieden sich in ihren Kosten für die Zuckerrübenproduktion nur gering (Abb. 4). Nahezu gleiche Aufwendungen entstanden in den Bereichen Düngemittel, Lohnmaschinen und Zinsanspruch (nicht dargestellt). Die um 2 cm verminderte Ablageentfernung in Direktsaat führte zu ca.  $15 \text{ € ha}^{-1}$  höheren Saatgutkosten. Die Pflanzenschutzmittelkosten stiegen bedingt durch höhere Herbizid- und Insektizidaufwendungen von Pflug zu Direktsaat leicht an. Hierfür sind vor allem die Kosten für nichtselektive Herbizide verantwortlich, die vor der Aussaat der Zuckerrübe in den reduziert bearbeiteten Varianten appliziert wurde. Variable und fixe Maschinenkosten sowie der Lohnanspruch sanken mit abnehmender Bodenbearbeitungsintensität. Die Gesamtkosten des Anbauverfahrens lagen mit  $1210 \text{ € ha}^{-1}$  im System Pflug am höchsten (Abb. 4). In den Verfahren Locker und Direktsaat wurden ca.  $30 \text{ € ha}^{-1}$  und im Verfahren Mulch  $45 \text{ € ha}^{-1}$  gegenüber Pflug eingespart. Geringe Differenzen in den Produktionskosten in Verbindung mit annähernd gleichem Ertrag führten zu nur geringfügigen Unterschieden im Deckungsbeitrag II zwischen den Varianten Pflug, Locker und Mulch. Der hohe Minderertrag bei Direktsaat wurde durch geringere Produktionskosten nur teilweise kompensiert und verursachte einen um  $165 \text{ € ha}^{-1}$  geringeren Deckungsbeitrag II.

### **3.3 Ertrag von Zuckerrübe in Abhängigkeit von der Bodenstruktur**

Bei den Untersuchungen möglicher Beziehungen von bearbeitungsbedingten Veränderungen der Bodenstruktur und dem Ertrag von Zuckerrüben reagierte der BZE an nahezu allen geprüften Standorten gleich auf Änderungen der Bodenbearbeitung und der Bestandesdichte. Mit abnehmender Bestandesdichte war ein deutlicher Rückgang des BZE zu beobachten (Abb. 5). Innerhalb der gleichen Stufe der Bestandesdichte nahm der BZE mit der Bodenbearbeitungsintensität ab. Diese Abnahme des BZE von Pflug über Mulch zu

Direktsaat war im Mittel über alle Einzelergebnisse hoch signifikant. Die Wechselwirkung der Faktoren Bodenbearbeitung und Bestandesdichte war nicht signifikant.

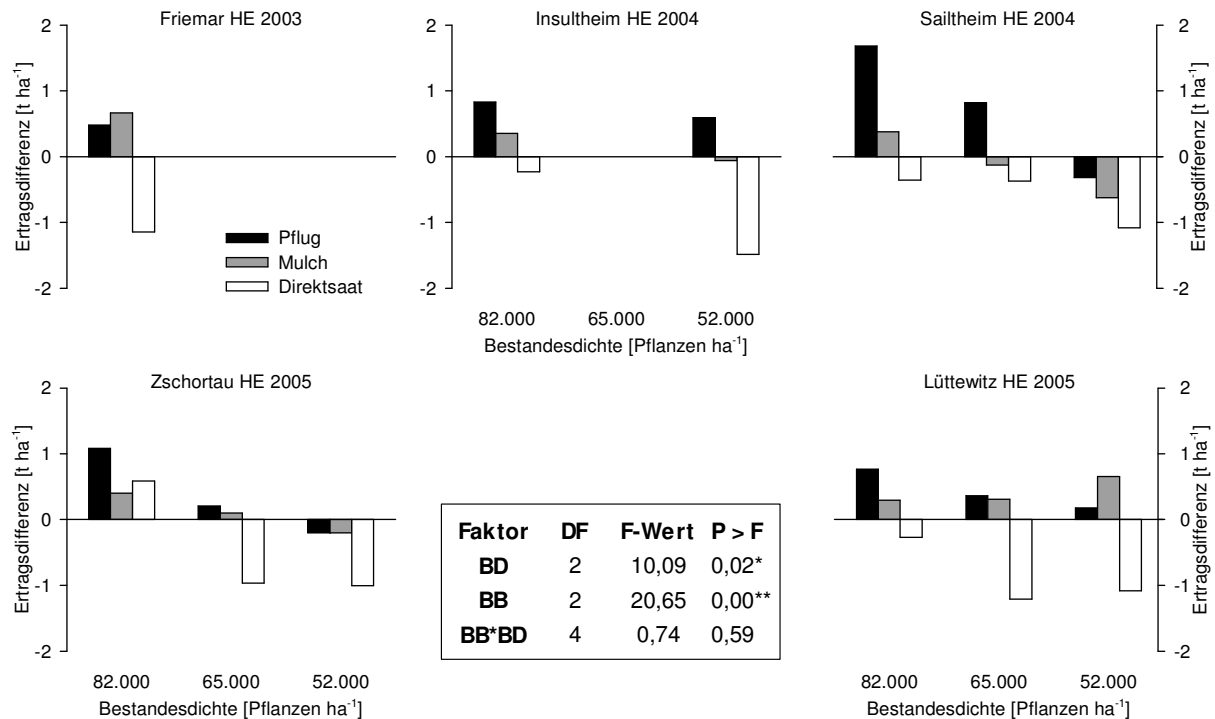


Abb. 5: Ertragsdifferenz (BZE) zum Standortmittel bei unterschiedlichen Bestandesdichtestufen (BD) nach langjährig differenzierter Bodenbearbeitung (BB), Handernte Friemar 2003, Insultheim / Sailtheim 2004 und Lüttewitz / Zschortau 2005, *signifikante Effekte bei  $\alpha = 5$  (\*), 1 (\*\*)*

Als Parameter der Bodenstruktur wurden der Eindringwiderstand, die Trockenrohdichte, die Luftkapazität und die nutzbare Feldkapazität untersucht (Abb. 6). Der Eindringwiderstand der Variante Pflug stieg bis zu einer Tiefe von 5 cm auf ca. 0,6 MPa an und blieb anschließend bis zu einer Tiefe von 25 cm nahezu konstant (Abb. 6 A). Im Verfahren Mulch trat in 5 cm Bodentiefe mit 0,9 MPa bereits ein deutlich höherer Wert auf, bei Direktsaat war der Eindringwiderstand mit 1,4 MPa nochmals wesentlich höher. Die statistische Auswertung des mittleren Eindringwiderstandes aus der Schicht 3–7 cm bestätigte signifikante Unterschiede zwischen den Bodenbearbeitungsvarianten.

---

Unterhalb von 5 cm Bodentiefe war in den Varianten Mulch und Direktsaat ein weiterer deutlicher Anstieg des Eindringwiderstandes zu beobachten. Ab 10 cm Bodentiefe lag der Eindringwiderstand bei Direktsaat zwischen 1,8 und 2,0 MPa, im Verfahren Mulch unterhalb 12 cm Tiefe sogar über 2,0 MPa. Dieser Unterschied zwischen Mulch und Direktsaat konnte jedoch statistisch nicht abgesichert werden. Der mittlere Eindringwiderstand in den Schichten 13–18 cm sowie 23–27 cm war im Verfahren Pflug signifikant niedriger als in Mulch und Direktsaat. Unterhalb von 35 cm Bodentiefe trat zwischen den Bodenbearbeitungsverfahren kein unterschiedlicher Eindringwiderstand auf.

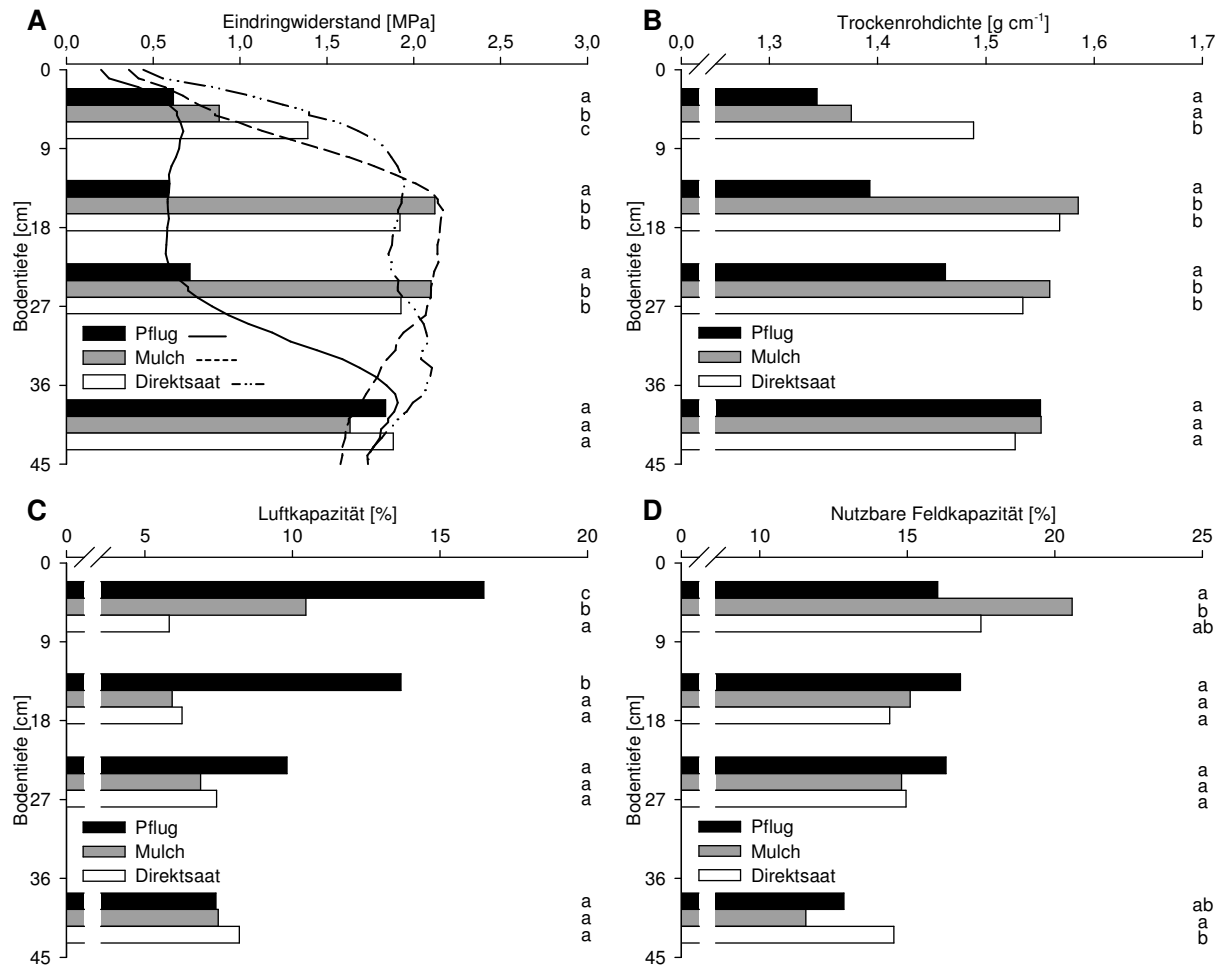


Abb. 6: Einfluss langjährig differenzierter Bodenbearbeitung auf Eindringwiderstand (A), Trockenrohdichte (B), Luftkapazität (C), und nutzbare Feldkapazität (D) im Mittel über die Standorte Friemar 2003, Insultheim und Sailtheim 2004, Lüttewitz und Zschortau 2005, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz ( $p \leq 0,05$ ; Tukey-Test)

Die Unterschiede zwischen den Bodenbearbeitungsverfahren in Abhängigkeit der Tiefe waren beim Parameter Trockenrohdichte ähnlich wie beim Eindringwiderstand: In der Schicht 3–7 cm war die Trockenrohdichte im Verfahren Pflug mit  $1,35 \text{ g cm}^{-3}$  nicht signifikant höher als im System Mulch mit  $1,37 \text{ g cm}^{-3}$  (Abb. 6 B). Demgegenüber war die Trockenrohdichte im System Direktsaat mit ca.  $1,5 \text{ g cm}^{-3}$  signifikant höher als in den übrigen Bodenbearbeitungsverfahren. Auch in den Schichten 13–18 cm und 23–27 cm lag die Trockenrohdichte in den Varianten Mulch und Direktsaat mit Werten von



1,55-1,60g cm<sup>-3</sup> signifikant höher als in der Variante Pflug. In 38–43 cm Bodentiefe traten keine Unterschiede zwischen den Bodenbearbeitungsverfahren auf.

Die Luftkapazität zeigte eine gegenläufige bearbeitungsspezifische Differenzierung im Vergleich zu Eindringwiderstand und Trockenrohddichte (Abb. 6 C): In der Schicht 3-7 cm war die Luftkapazität im System Pflug mit 16,5 % am höchsten. In Variante Mulch lagen die Werte mit 10,5 % signifikant niedriger. Die niedrigste Luftkapazität trat im Verfahren Direktsaat mit 6,0 % auf. Auch in 13-18 cm Tiefe lag die Luftkapazität in Pflug mit 13,5 % erheblich über der mit 6–7 % signifikant geringeren Luftkapazität der Verfahren Mulch und Direktsaat. Tendenziell war die Luftkapazität in der Schicht 23-27 cm in Pflug ebenfalls höher als in den reduziert bearbeiteten Verfahren. Der Unterschied von 3 % absolut konnte jedoch nicht statistisch abgesichert werden. Im Unterboden (38-43 cm) war die Luftkapazität in allen Bodenbearbeitungsverfahren annähernd gleich.

Die nutzbare Feldkapazität war in der Schicht 3-7 cm des Verfahrens Pflug mit 16,0 % signifikant niedriger als im Verfahren Mulch mit 20,5 %, im Verfahren Direktsaat betrug die nutzbare Feldkapazität 17,5 % (Abb. 6D). In Mittel- und Unterkrume (13-18 cm und 23-27 cm) war die nutzbare Feldkapazität des Systems Pflug tendenziell höher als bei den Verfahren mit reduzierter Bodenbearbeitung. Im Horizont 38-43 cm war die nutzbare Feldkapazität im Verfahren Direktsaat signifikant höher als in Mulch.

Die Veränderung einzelner Bodenstrukturparameter in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung wirkte sehr unterschiedlich auf den Ertrag der Zuckerrüben. Eine enge Beziehung bestand zwischen dem Eindringwiderstand bzw. der Trockenrohddichte und dem BZE. Vor allem in den oberen Bodenschichten (3-7 cm und 13-18 cm) war das Bestimmtheitsmaß mit Werten zwischen 0,21 und 0,33 hoch signifikant (Tab. 2). Ebenso wies die Luftkapazität in den Tiefen 3-7 und 13-18 cm eine enge positive Beziehung zum Ertrag auf. Mit zunehmender Tiefe wurde die Beziehung der Kenngrößen der Bodenstruktur zum BZE weiter. Im Unterboden bestand bei keinem Parameter eine

signifikante Beziehung zum BZE. Die nutzbare Feldkapazität des Bodens wurde nur in geringem Maße von der Bodenbearbeitung beeinflusst und zeigte somit auch in keiner Tiefe eine Beziehung zum BZE.

Tab. 2: Bestimmtheitsmaß der Beziehung zwischen ausgewählten Parametern der Bodenstruktur und dem Bereinigten Zuckerertrag (Ertragsdifferenz zum Standortmittel), Friemar 2003, Insultheim und Sailtheim 2004, Lüttewitz und Zschortau 2005

<b>Tiefe [cm]</b>	<b>Eindring- widerstand</b>	<b>Trockenroh- dichte</b>	<b>Luft- kapazität</b>	<b>nutzbare Feldkapazität</b>
3-7	$r^2 = 0,27^{**}$	$r^2 = 0,33^{**}$	$r^2 = 0,27^{**}$	$r^2 = 0,00$
13-18	$r^2 = 0,21^{**}$	$r^2 = 0,25$	$r^2 = 0,23^{**}$	$r^2 = 0,01$
23-27	$r^2 = 0,21^{**}$	$r^2 = 0,13$	$r^2 = 0,05$	$r^2 = 0,00$
38-43	$r^2 = 0,03$	$r^2 = 0,02$	$r^2 = 0,00$	$r^2 = 0,03$
3-27	$r^2 = 0,27^{**}$	$r^2 = 0,30$	$r^2 = 0,25^{**}$	$r^2 = 0,00$

signifikante Effekte bei  $\alpha = 5$  (\*), 1 (\*\*)

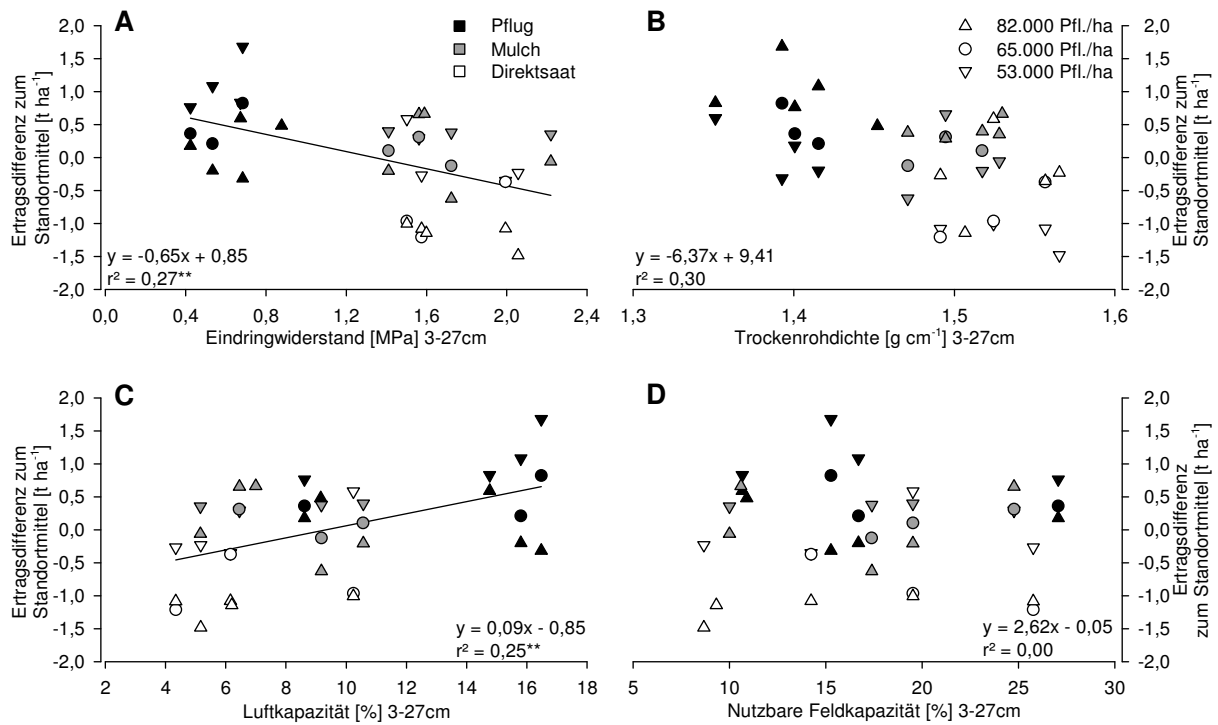


Abb. 7: Bereinigter Zuckerertrag (Ertragsdifferenz zum Standortmittel) in Abhängigkeit der Bodenparameter Eindringwiderstand (A), Trockenrohdichte (B), Luftkapazität (C), und nutzbarer Feldkapazität (D) bei langjährig differenzierter Bodenbearbeitung; Friemar 2003, Insultheim / Sailtheim 2004 und Lüttewitz / Zschortau 2005  
*signifikante Effekte bei  $\alpha = 5$  (\*), 1 (\*\*)*

#### 4 Diskussion

Der Verzicht auf eine wendende Bodenbearbeitung führt zu Veränderungen der physikalischen, chemischen und biologischen Bodeneigenschaften (PEKRUN et al. 2003). Diese Veränderungen können das Wachstum von Kulturpflanzen erheblich beeinflussen. Zunächst soll diskutiert werden, welchen Einfluss Verfahren reduzierter Bodenbearbeitung auf den Ertrag von Winterweizen und Zuckerrübe sowie die Rentabilität des Anbaus haben. Anschließend werden Unterschiede in der Bodenstruktur zwischen den Bodenbearbeitungsverfahren dargelegt und deren Beziehungen zum Ertrag der Zuckerrübe detailliert betrachtet.

#### **4.1 Ertrag, Qualität und Rentabilität von Winterweizen**

Pfluglose Bodenbearbeitungsverfahren zur Aussaat von Winterweizen sind mittlerweile in der landwirtschaftlichen Praxis etabliert und optimiert (EPPERLEIN 2001). Dies verdeutlichen die geringen Ertragsunterschiede zwischen den Varianten Pflug, Locker und Mulch im vorliegenden Versuch. Niedrigere Bestandesdichten bei reduzierter Bodenbearbeitung wurden in den Verfahren Locker und Mulch durch eine erhöhte Anzahl Körner pro Ähre und eine geringfügig gesteigerte Tausendkornmasse nahezu vollständig kompensiert. Ertragsgleichheit in mehrjährigen Versuchen zwischen konventionellen und pfluglosen Bodenbearbeitungsverfahren wurde auch von EHLERS & CLAUPEIN (1994) sowie KÖNIG et al. (2005) beobachtet. Lediglich im Verfahren Direktsaat mit deutlich niedrigeren Bestandesdichten traten Mindererträge auf, die im Mittel aller Standorte und Jahre ca. 5 % betragen. Ähnliche Beobachtungen machten HAMMEL (1995) und ANKEN et al. (1997). Unter günstigen Aussaatbedingungen konnten jedoch auch im Verfahren Direktsaat einiger Einzelversuche gleich hohe Erträge wie im Verfahren Pflug erzielt werden (vgl. KAHNT 1969, SCHLÜTER 2003, CHERVET et al. 2005). Insbesondere Blattfrüchte wie die Zuckerrübe hatten eine günstige Vorfruchtwirkung und ermöglichten in den meisten Fällen eine problemlose Aussaat (PANSE et al. 1994). Die Aussaat des Stoppelweizens gestaltete sich hingegen aufgrund der hohen Mulchaufgabe oftmals schwierig. Zudem war die Strohverteilung des Mähdeschers bei der Ernte der Vorfrucht nicht immer optimal, so dass im System Direktsaat der Feldaufgang nochmals vermindert war. Die eingesetzten Direktsaatmaschinen mit Scheiben- und Meißelscharen waren dabei nicht immer in der Lage, das Saatgut mit ausreichendem Bodenanschluss zu platzieren, was sich negativ auf Feldaufgang und Bestandesetablierung auswirkte (WILLERT 1994). Die folglich niedrigeren Pflanzenzahlen in lückigen Beständen konnten oftmals nicht durch andere Ertragskomponenten kompensiert werden. Aus diesem Grund wurde seit 2003 eine Erhöhung der Aussaatstärke um 10 % bei erschwerten Aussaatbedingungen in Direktsaat

vorgenommen. Diese Maßnahme kann allerdings kein Ausgleich für flächenhafte Pflanzenausfälle als Folge extrem ungleichmäßiger Strohverteilung sein.

Die Gesamtkosten des Produktionsverfahrens Winterweizen nahmen mit jeder Reduzierungsstufe der Bodenbearbeitungsintensität signifikant ab. Die variablen Verfahrenskosten stiegen mit abnehmender Bearbeitungsintensität geringfügig an. Dieser Anstieg war im Bereich Pflanzenschutz durch zusätzliche Aufwendungen bei Herbiziden begründet, die bei pflugloser Bearbeitung zur chemischen Bekämpfung von Ausfallgetreide und an Standorten, die zur Vergrasung neigten, in erhöhter Aufwandmenge eingesetzt wurden. Weiterhin traten bei reduzierter Bodenbearbeitung vereinzelt Probleme mit Schnecken und Mäusen auf, deren Bekämpfung höhere Molluskizid- und Rodentizidkosten verursachte. Bei den Fungiziden war vor dem Hintergrund der verwendeten Sorten mit einer geringen Anfälligkeit gegenüber Blattkrankheiten und *Fusarium* spp. keine Differenzierung der Aufwandmenge nötig (PRINGAS et al. 2002). Den leicht steigenden variablen Kosten bei abnehmender Bearbeitungsintensität standen deutliche Einsparungen bei den variablen Maschinenkosten gegenüber. DEBRUCK (1997) zufolge machen diese Einsparungen die pfluglosen Verfahren so attraktiv, dass sie in der landwirtschaftlichen Praxis besonders bei der Weizenbestellung nach Blattfrüchten immer häufiger angewendet werden.

Das gesamte Einsparpotenzial wird jedoch erst bei Einbeziehung des Lohnanspruchs und der fixen Maschinenkosten deutlich: Die durch geringfügige Mindererträge bei reduzierter Bodenbearbeitung bedingte Absenkung der Marktleistung wurde durch die erhebliche Kostenreduzierung dieser Verfahren überkompensiert und führte in den Verfahren mit der geringsten Bearbeitungsintensität zur höchsten Rentabilität.

## 4.2 Ertrag, Qualität und Rentabilität von Zuckerrüben

Auch im Zuckerrübenanbau sind Verfahren konservierender Bodenbearbeitung mittlerweile weit verbreitet. Rund 20 % der Anbaufläche in Deutschland werden derzeit pfluglos bestellt (MERKES et al. 2003). Grundlage für einen hohen Rübenenertrag ist ein mittlerer bis hoher Feldaufgang, der zu einer ausreichend hohen Bestandesdichte führt. Aus Rübenenertrag und technischer Verarbeitungsqualität ergibt sich der BZE. Dieser ist eine wichtige Zielgröße im Zuckerrübenanbau. Nach MÄRLÄNDER (1991) ist zur Erzielung des maximalen BZE eine Bestandesdichte von ca. 80.000 Pflanzen ha<sup>-1</sup> oder höher notwendig. Diese wurde im Mittel der Standorte und Jahre im konventionellen Verfahren Pflug sowie in den reduziert bearbeiteten Verfahren Locker und Mulch erreicht. Demgegenüber lag die Bestandesdichte in der Direktsaat-Variante mit ca. 72.000 Pflanzen ha<sup>-1</sup> trotz einer 11 % höheren Aussaatstärke signifikant niedriger als die der anderen Verfahren. Primäre Ursache für diese Unterschiede im Feldaufgang waren ungünstige Aussaatbedingungen im Verfahren Direktsaat: Die unterlassene Bodenbearbeitung führte zu einer Anreicherung der Ernterückstände (Weizenstroh, Senfreste) an der Bodenoberfläche. Diese Mulchschicht konnte beim Sävorgang vom Scheibenschar nicht immer durchtrennt werden, um einen ausreichenden Boden- und somit auch Keimwasseranschluss für die Rübenpille zu gewährleisten. Zudem trat oft eine unzureichende Bedeckung des Zuckerrübensaatgutes mit losem, feinkrümeligem Boden auf, der nach RADEMACHER (1990) von besonderer Bedeutung für Keimung und Feldaufgang ist. Eine leichte Erhöhung des Feldaufgangs konnte durch die Einführung einer flachen Saatbettbereitung zur gleichmäßigen Verteilung der Ernterückstände erreicht werden. Dieser von BECKER (1997) eingeführte Bearbeitungsgang im Verfahren Direktsaat konnte aber nicht in allen Einzelversuchen ein günstiges Saatbett zur Erzielung ausreichender Bestandesdichten schaffen. Sehr hohe Strohaufgaben und durch ungleichmäßige Strohverteilung entstandene Strohschwade konnten oftmals mit einem Bearbeitungsgang nicht verteilt bzw. eingearbeitet werden.

Nach BRUNOTTE et al. (2001) sind bei nichtwendender Bodenbearbeitung Häckselqualität und Strohverteilung bei der Ernte der Vorfrucht von herausragender Bedeutung für die Aussaatbedingungen der Folgekultur.

RICHARD et al. (1995) und BISCHOFF (1999) ermittelten bereits nach einem einjährigen Verzicht auf Bodenbearbeitung eine niedrigere Bestandesdichte gegenüber Mulchsaatverfahren mit Stoppelbearbeitung und Saatbettbereitung bzw. gegenüber einer konventionellen Bodenbearbeitung mit dem Pflug.

Die Qualität der Zuckerrüben wurde durch die Bodenbearbeitung nur wenig beeinflusst. Ähnlich wie bei HOFFMANN (1996) wurde der Zuckergehalt durch unterschiedliche Bodenbearbeitung nicht beeinflusst. Der BZE war in den Verfahren Pflug, Locker und Mulch gleich. Einen annähernd gleichen Rübenenertrag auf gepflügten und konservierend bearbeiteten Flächen stellte auch ECCLESTONE (2001) fest.

Die Gesamtkosten der Zuckerrübenproduktion waren bei reduzierter Bodenbearbeitung geringfügig niedriger als im Verfahren Pflug. Den mit abnehmender Bearbeitungsintensität sinkenden variablen Verfahrenskosten stand ein deutlicher Anstieg der Aufwendungen für Pflanzenschutz (ARNOLD-REIMER 1994, BRÄUTIGAM 1994, EHLERS & CLAUPEIN 1994) und Saatgut gegenüber. Im vorliegenden Versuch war der erhöhte Herbizidaufwand zum größten Teil durch eine zusätzliche Behandlung mit einem nicht selektiven Herbizid zur Erfassung der Altverunkrautung vor der Zuckerrübenaussaat bedingt. Im Verfahren Direktsaat waren in wenigen Einzelversuchen aufgrund der geringen Konkurrenzkraft der Zuckerrübe bei niedriger Bestandesdichte zusätzliche Nachauflaufbehandlungen gegen mono- und dikotyle Unkräuter notwendig. Neben erhöhten Pflanzenschutzkosten waren die Saatgutkosten in Direktsaat bedingt durch die 2 cm geringere Ablageentfernung ebenfalls erhöht.

Die variablen Verfahrenskosten sanken ebenso wie die fixen Verfahrenskosten und der Lohnanspruch mit der Bearbeitungsintensität deutlich. Dies wurde auch von EICHHORN et

al. (1991), BRUNOTTE & SOMMER (1994) und BRUNOTTE et al. (2001) festgestellt. Insgesamt war die Relation von Kostenreduzierung zu verfahrensbedingten Mehraufwendungen bei Pflanzenschutz und Saatgut im Verfahren Mulch am günstigsten: Hier konnten gegenüber dem System Pflug 43 € ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> eingespart werden.

Bedingt durch den vergleichsweise hohen Produktwert der Zuckerrübe wird der Deckungsbeitrag der Verfahren stärker durch Unterschiede im BZE als in den Produktionskosten geprägt. Jedoch führten die reduzierten Kosten im Verfahren Mulch trotz geringerem BZE zu einem tendenziell höheren Deckungsbeitrag II gegenüber dem Verfahren Pflug. Der höchste Deckungsbeitrag II wurde im Verfahren Locker durch das Zusammenspiel geringerer Produktionskosten und erhöhtem BZE erzielt. Das Verfahren Direktsaat hingegen war durch einen hohen Minderertrag geprägt, der durch geringere Produktionskosten nicht kompensiert werden konnte: Gegenüber dem Verfahren Locker lag der Deckungsbeitrag II um ca. 350 € ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> niedriger.

### **4.3 Ertrag von Zuckerrübe in Abhängigkeit von der Bodenstruktur**

Wie zuvor gezeigt, lag der Ertrag im Verfahren Direktsaat im Mittel der Einzelergebnisse von Standort und Jahr (= Umwelt) um ca. 15 % niedriger als bei Bearbeitung mit dem Pflug. Parallel dazu war auch die Bestandesdichte um ca. 15 % geringer, woraus sich ableiten ließe, dass die geringere Bestandesdichte die Ursache des geringeren Ertrages im Verfahren Direktsaat war. Eine detaillierte Betrachtung der Ergebnisse aus den Einzelversuchen zeigte jedoch, dass in der Regel auch bei gleicher oder ähnlicher Bestandesdichte im Verfahren Direktsaat der Ertrag niedriger lag als im System Pflug. Nach MÄRLÄNDER (1991) ist bei einem Rückgang der Bestandesdichte von 86.000 Pflanzen ha<sup>-1</sup> (langjähriges Mittel Pflug) auf 72.000 Pflanzen ha<sup>-1</sup> (langjähriges Mittel Direktsaat) lediglich mit einem Ertragsrückgang von 3 % und nicht, wie im vorliegenden Versuch, mit ca. 15 % zu rechnen. Weiterhin zeigen die Ergebnisse der 2003-2005



durchgeführten Handerten, dass der BZE auch bei gleicher Bestandesdichte mit abnehmender Bearbeitungsintensität sank. Es ist daher anzunehmen, dass die unterlassene Bodenbearbeitung im Verfahren Direktsaat zu erheblichen Veränderungen im System Boden/Pflanze führte, die über den Effekt der geringeren Bestandesdichte hinaus das Rübenwachstum negativ beeinflussten. Dabei wurde von 2003-2005 insbesondere geprüft, ob Unterschiede in Nährstoffverfügbarkeit bzw. –aneignungsvermögen sowie in der Bodenstruktur Ursache für die gefundenen Ertragsunterschiede sind.

Aus den Untersuchungen der Gehalte an verfügbaren Nährstoffen im Boden (nicht dargestellt) ging hervor, dass reduzierte Bodenbearbeitung und Direktsaat sehr wahrscheinlich nicht zu einer Unterversorgung der Pflanzen mit Nährstoffen führte und somit als Ursache für bearbeitungsbedingte Ertragsunterschiede ausscheidet. Auch TOMANOVÁ et al. (2006) folgerten aus ihren Untersuchungen, dass langjährig reduzierte Bodenbearbeitung nicht zu einer ertragsrelevanten Verringerung des Angebots an den Nährstoffen P, K und Mg führt. Durch stark reduzierte Bearbeitung verschärfter N-Mangel, wie er von TOMANOVÁ et al. (2006) bei unterlassener oder niedriger N-Düngung beobachtet wurde, ist für den vorliegenden Versuch ebenfalls weitgehend auszuschließen. Demgegenüber traten deutliche Veränderungen der Bodenstruktur in Abhängigkeit von der Bearbeitung auf, die nachfolgend im Detail diskutiert werden.

Ein Maß für die mechanische Festigkeit eines Bodens bzw. die Verschiebbarkeit der Bodenteilchen ist der Eindringwiderstand (FRIEDRICH & FRANKEN 2003). Er kann somit als Indikator für mechanische Widerstände dienen, die die Pflanzenwurzel bei Erschließung des Bodens für die Wasser- und Nährstoffaufnahme überwinden muss. Allerdings kann aufgrund der unterschiedlichen Größe von Kegelspitze und Wurzel sowie unterschiedlicher Bewegungsbahnen (Messspitze starr - Wurzel flexibel) nicht unmittelbar auf die Durchwurzelbarkeit geschlossen werden (HORN et al. 1987). Bei gleicher Bodenart variiert der Eindringwiderstand vor allem in Abhängigkeit vom Bodenfeuchtegehalt und der

Trockenrohdichte (BOONE & VEEN 1994, COELHO et al. 2000). Bei konstanter Bodenfeuchte steigt der Eindringwiderstand mit zunehmender Trockenrohdichte an (CZERATZKY 1972, LAMPURLANES & CANTERO-MARTINEZ 2003). Da alle Messungen des Eindringwiderstandes im Frühjahr bei einer Bodenfeuchte nahe Feldkapazität durchgeführt wurden, kann davon ausgegangen werden, dass der erhöhte Eindringwiderstand in der Krume der Varianten Mulch und Direktsaat in einer gegenüber dem Verfahren Pflug erhöhten Trockenrohdichte begründet liegt. Dieser Zusammenhang erklärt die sehr enge positive Korrelation mit einem Korrelationskoeffizienten von  $r=0,93$  (nicht dargestellt) zwischen Eindringwiderstand und Trockenrohdichte sowie die gleichgerichtete Reaktion dieser Parameter auf Bearbeitungsänderungen.

Eindringwiderstand und Trockenrohdichte können sich u.a. auf Wurzelmasse und -länge auswirken und somit die Wasser- und Nährstoffausschöpfung in Krume und Unterboden beeinflussen (EHLERS 1996). In Untersuchungen von EHLERS et al. (1983) schränkte ein Eindringwiderstand von mehr als 3,6 MPa das Wurzelwachstum von Hafer deutlich ein. LIEBHARD et al. (1995) stellte fest, dass bei einem Eindringwiderstand  $>2$  MPa das Wurzelwachstum von Zuckerrübe, Mais und Weizen stark beeinträchtigt war.

Aus den Ergebnissen der vorgestellten Untersuchungen geht hervor, dass insbesondere im Krumbereich der Boden in den Verfahren Mulch und Direktsaat deutlich erhöhte Eindringwiderstände und Trockenrohdichten gegenüber Pflug aufwies. Auch zahlreiche andere Untersuchungen belegen, dass der Verzicht auf eine krumentiefe Lockerung über einen längeren Zeitraum hinweg zu höheren Trockenrohdichten (STOCKFISCH 1997) und Eindringwiderständen (KNITTEL & STANZEL 1976) in der Krume eines Bodens führt.

Während der Boden im geprüften Verfahren Pflug mit Eindringwiderständen von ca. 0,6 MPa und Trockenrohdichten im Bereich von  $1,35\text{--}1,48\text{ g cm}^{-3}$  in dem von CZERATZKI (1972) angegebenen optimalen Dichtebereich für das Zuckerrübenwachstum lag, traten bei reduzierter Bodenbearbeitung deutlich erhöhte Werte in der Krume auf. JAGGARD (1977)

beobachtete wie DRAYCOTT (1970) bei Trockenrohdichten  $>1,5 \text{ g cm}^{-3}$  in den oberen 16 cm der Krume einen exponentiellen Rückgang des Zuckerertrages. Diesem Teil der Krume vergleichbar ist in der vorliegenden Untersuchung der als Ober- und Mittelkrume (Probenahmetiefen 3-7 cm und 13-18 cm) bezeichnete Bereich.

Bildet man aus den Ergebnissen der Stechzylinderuntersuchungen aus Ober- und Mittelkrume eine durchschnittliche Trockenrohdichte, so werden die von JAGGARD (1977) als kritisch angegebenen  $1,5 \text{ g cm}^{-3}$  im Verfahren Direktsaat ( $1,53 \text{ g cm}^{-3}$ ) nahezu immer überschritten. Diese Ergebnisse erklären den Minderertrag bei Direktsaat in nahezu allen Einzelversuchen. Die mittlere Trockenrohdichte im Verfahren Mulch lag mit  $1,48 \text{ g cm}^{-3}$  unmittelbar an der Obergrenze des von JAGGARD (1977) ermittelten optimalen Bodendichtebereichs. Im Verfahren Mulch auftretende Einzelversuchergebnisse sowohl mit als auch ohne Minderertrag gegenüber dem System Pflug bzw. sowohl mit als auch ohne Mehrertrag gegenüber Direktsaat sind vermutlich durch die Variation der Trockenrohdichte in Relation zum kritischen Wert von  $1,5 \text{ g cm}^{-3}$  zwischen den Einzelversuchen bedingt. Der Boden des Verfahrens Pflug hatte mit einer Trockenrohdichte von  $1,37 \text{ g cm}^{-3}$  eine optimale Bodendichte für das Pflanzenwachstum.

Eine genauere tiefenbezogene Betrachtung der Daten zeigt, dass strukturbedingte Ertragsunterschiede zwischen den Verfahren Mulch und Direktsaat vor allem über Unterschiede der Bodenstrukturparameter in der Oberkrume (0-7 cm) zu erklären sind. Lediglich in diesem bei Direktsaat nicht mehr bearbeiteten Bereich trat bei den Kenngrößen Trockenrohdichte und Eindringwiderstand eine Differenzierung zwischen den Verfahren Mulch und Direktsaat auf. Beide Parameter waren in Direktsaat gegenüber Mulch deutlich erhöht und führten zu einem Ertragsrückgang.

Möglicherweise wirkte der erhöhte Bodenwiderstand in der Oberkrume nicht unmittelbar negativ auf das Rübenwachstum, sondern über eng im Zusammenhang mit der Trockenrohdichte stehende Veränderungen im Bodenlufthaushalt. Bei zunehmender Dichte

des Bodens reduziert sich zunächst der Anteil grober Poren, die für den Lufthaushalt von Bedeutung sind (RICHARD et al. 1995). Dies erklärt die Abnahme der Luftkapazität mit abnehmender Bearbeitungsintensität bei gleichzeitiger Erhöhung der Trockenrohdichte. Beide Parameter waren mit einem Korrelationskoeffizienten von  $r=0,89$  eng korreliert (nicht dargestellt). Die geringere Luftkapazität kann zu einer höheren  $\text{CO}_2$ -Konzentration bei abnehmendem Sauerstoffgehalt führen, was ein geringeres Wurzelwachstum verursachen kann (HARTGE 1965, GEISLER 1969, MOHR 1978). Nach Czeratzki (1972) ist eine Luftkapazität von 10 % optimal für das Zuckerrübenwachstum. Luftkapazitäten von 10 % und höher traten über den gesamten Krumbereich lediglich im Verfahren Pflug auf. In Mulch lag die Luftkapazität nur in der Oberkrume bei 10 %. In Mittel- und Unterkrume waren die Werte mit 5-7 % deutlich niedriger. Das Verfahren Direktsaat hatte im gesamten Krumbereich eine niedrige Luftkapazität.

Ähnlich wie Trockenrohdichte und Eindringwiderstand korrelierte auch die Luftkapazität in der Oberkrume eng mit dem Ertrag. Der höchste BZE wurde jeweils bei der höchsten Luftkapazität im Verfahren Pflug erzielt. Deutliche niedrigere Erträge traten im Verfahren Mulch auf, in dem zwar in der Oberkrume die Luftkapazität im Mittel ca. 10 % betrug, jedoch in den darunter liegenden Schichten wesentlich niedriger lag. Im Verfahren Direktsaat war über die gesamte Krume betrachtet die Luftkapazität am niedrigsten. Dies ging mit dem geringsten BZE einher.

Eine weitere Erklärung für bearbeitungsbedingte Ertragsunterschiede könnten Unterschiede im Wasserhaushalt sein, obwohl die nutzbare Feldkapazität nur wenig zwischen den Bodenbearbeitungsverfahren differenzierte. Höhere nutzbare Feldkapazitäten in der Oberkrume bei pflugloser Bodenbearbeitung können durch eine Anreicherung von  $C_{\text{org}}$  bedingt sein, wie sie von verschiedenen Autoren berichtet wurde (STOCKFISCH et al. 1999, FREIBAUER et al. 2004). Höhere  $C_{\text{org}}$ -Gehalte führen zu einem Anstieg der nutzbaren Feldkapazität (RÜCKNAGEL et al. 2003). Auch wenn die Unterschiede

in der nutzbaren Feldkapazität zwischen den Bearbeitungsvarianten nur gering waren, so könnte dennoch eine verbesserte Infiltration und somit ein verminderter Oberflächenabfluss bei reduzierter Bodenbearbeitung zu einer günstigeren Wasserversorgung der Pflanzen in diesen Verfahren geführt haben. Für eine Erklärung der Mindererträge bei konservierender Bodenbearbeitung kann dieser Sachverhalt allerdings nicht herangezogen werden.

Pfluglose Bodenbearbeitung beeinträchtigte im vorliegenden Versuch die Bodenstruktur und damit die Wachstumsbedingungen für die Kulturpflanzen. Offensichtlich reagierte die Zuckerrübe sehr sensibel mit Mindererträgen auf erhöhte Eindringwiderstände und Trockenrohdichten und / oder verminderte Luftkapazitäten in der Oberkrume. Über welchen Mechanismus die beschriebenen Strukturunterschiede auf das Zuckerrübenwachstum wirkten, kann an dieser Stelle nicht abschließend geklärt werden. Ein wichtiger Aspekt bei der Beurteilung ist, dass im Getreide bei gleichen Bestandesdichten keinerlei Mindererträge bei reduzierter Bodenbearbeitung einschließlich Direktsaat auftraten. Die Bestimmung der Packungsdichte (ANONYMUS, 2005) an den untersuchten Standorten ergab keinerlei Hinweise auf Durchwurzelungsprobleme in Direktsaat (TEIWES 2003, 2004 & 2005). Werte, die als kritisch für das Wurzelwachstum einzustufen sind, wurden nicht erreicht. Dazu gehören Eindringwiderstände größer 3,6 MPa (EHLERS 1983) und Luftkapazitäten im Oberboden unter 8 % bzw. unter 5 % im Unterboden (WERNER & PAUL 1999). Nach Ansicht von HOFFMANN (1993) können Pflanzenwurzeln beim Erschließen des Bodens Schwächezonen in den Inter- und Intraaggregaträumen nutzen, deren Eindringwiderstand vermutlich geringer ist als der des Durchschnitts des Bodens. Da keinerlei Hinweise auf Unterschiede im Faserwurzelwachstum gefunden wurden, kann bei unveränderter Nährstoffverfügbarkeit (siehe oben) auch nicht von einem eingeschränkten Aneignungsvermögen der Pflanzen für Nährstoffe und damit einer verminderten Versorgung mit Nährstoffen und vermutlich auch Wasser bei reduzierter Bodenbearbeitung ausgegangen werden.

Möglicherweise führten die Veränderungen der Bodenstruktur nicht zu einer Einschränkung des Faserwurzelsystems, sondern des sekundären Dickenwachstums der Rüben. Der zur Ausbildung des Rübenkörpers zu überwindende höhere Eindringwiderstand könnte zu einem Anstieg der Veratmung von Assimilaten bzw. zu einem Rückgang der Nettophotosyntheserate geführt haben (MASLE et al. 1990). Darüber hinaus zeigte bereits GLIEMEROTH (1953) auf, dass die Zuckerrübe sehr sensibel mit der Ausbildung von Verzweigungen am Rübenkörper (Beinigkeits) auf ungünstige Standortverhältnisse reagiert. Aus den Bonituren der Handernt ergaben sich bei reduzierter Bodenbearbeitung ein signifikant höherer Anteil beinigter Rüben sowie eine deutlich höhere Scheitelhöhe. HANUS & BERNARD (1964) beobachteten ebenfalls eine höhere Beinigkeit bei abnehmender Luftdurchlässigkeit des Bodens. Um allerdings eine direkte Beeinflussung des BZE bzw. der Atmungsrate durch erhöhte Eindringwiderstände nachzuweisen, bedarf es zusätzlicher Messungen/Untersuchungen der Nettophotosyntheserate unter dem Einfluss differenzierter Bodenbearbeitung.

#### **4.4 Schlussfolgerungen**

Konservierende Bodenbearbeitungsverfahren sind ausgereift und praxistauglich. Allerdings erfordert der Pflugverzicht ein hohes Maß an Engagement und Sorgfalt. Je geringer die Eingriffsintensität bei der Bodenbearbeitung ist, umso mehr muss bereits bei der Ernte der Vorfrucht penibel auf eine gleichmäßige Verteilung der Ernterückstände geachtet werden. Dies ist Voraussetzung für eine erfolgreiche Bestandesetablierung der Folgekultur. Weiterhin müssen Sortenwahl und Pflanzenschutz an das Bearbeitungssystem angepasst werden. Sofern diese Punkte beachtet werden, sind beim pfluglosen Anbau von Winterweizen ökonomische und ökologische Vorteile zu erzielen. Eine erhebliche Kosteneinsparung in Verbindung mit gleichen Erträgen kann zu höheren Deckungsbeiträgen führen. Weiterhin steigt bei konservierender Bodenbearbeitung durch größere

Arbeitsbreiten und -geschwindigkeiten die Schlagkraft und mit ihr die Flexibilität der Arbeitserledigung deutlich an, was insbesondere auf großen Marktfruchtbetrieben von Bedeutung sein kann.

Gleiches gilt prinzipiell auch für den Zuckerrübenanbau: Konservierende Bodenbearbeitung vereint sichere und hohe Rübenerträge mit ökonomischen und ökologischen Vorteilen. Die vorliegende Untersuchung verdeutlicht jedoch, dass die Zuckerrübe höhere Anforderungen an die Bodenstruktur stellt. Dichte Lagerung bzw. ein eingeschränkter Lufthaushalt führten bei extremer Reduzierung der Eingriffsintensität zu Mindererträgen, deren physiologische Ursachen bislang weitgehend unklar sind. Daher sollte der Boden zur Zuckerrübe gelockert werden. Die Anwendung des Pfluges ist dabei nicht notwendig, wie die vorliegenden Versuchsergebnisse verdeutlichen, in denen die höchsten Deckungsbeiträge bei mischender Lockerung erzielt wurden.

Konservierende Bodenbearbeitung bietet zudem eine effiziente Möglichkeit, Bodenerosion durch Wasser und Wind zu reduzieren und insgesamt zur nachhaltigen Entwicklung von Anbausystemen beizutragen.

### **Danksagung**

Besonderer Dank gilt dem Kuratorium für Versuchswesen und Beratung im Zuckerrübenanbau, Ochsenfurt, für die finanzielle Förderung dieser Versuchsserie, sowie dem Geschäftsbereich Landwirtschaft der Südzucker AG für die Bereitstellung der Flächen und den Betriebsleitern für die Durchführung aller Anbaumaßnahmen. Ines Wiese, Wilfried Hübener und Manfred Jordan sei für die umfassende Unterstützung bei der Bodenprobenahme gedankt, dem bodenphysikalischen Labor der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft für deren Analyse.

## 5 Literatur

- ANKEN, T., HEUSSNER, J., WEISSKOPF, P., ZIEHLMANN, U., FORRER, H.-R., HÖGGER, C., SCHERER, C., MOZAFAR, A. & STURNY, W.G. (1997): Bodenbearbeitungssysteme, Direktsaat stellt die höchsten Anforderungen. FAT-Bericht 501, 1-14
- ANONYMUS (1999): BBODSCHG, 1998: Gesetz zum Schutz des Bodens. Bundesgesetzblatt, Teil I Nr.16, 502-510
- ANONYMUS (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage. Arbeitsgruppe Boden, Hrsg.: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe sowie Geologische Landesämter in der Bundesrepublik Deutschland, Hannover
- ARNOLD-REIMER, K. (1994): Einfluß konservierender Bodenbearbeitung auf Pflanzenkrankheiten und Unkräuter im Getreide und Konsequenzen für einen gezielten Pflanzenschutz. Dissertation, Göttingen
- BAEUMER, K. (1994): Verfahren und Wirkungen der Bodenbearbeitung. In: Integrierter Landbau (Diercks, R. & Heitefuss, R., Hrsg.). Verlagsunion Agrar, 68-87
- BECKER, C. (1997): Dauerhaft pfluglose Bodenbearbeitungssysteme und Betriebsgröße -eine pflanzenbaulich-ökonomische Analyse-. Dissertation, Göttingen
- BISCHOFF, J. (1999): Trockenheit stresst Rüben. Bauernzeitung 9, 40-41
- BOONE, F.R. & VEEN, B.W. (1994): Mechanisms of crop responses to soil compaction. (Soane, B.D. & van Ouwerkerk, C. Hrsg.). Soil compaction in crop production. New York: Elsevier, 1994, 237-264
- BRÄUTIGAM, V. (1994): Einfluß verschiedener Bodenbearbeitungssysteme auf Halmbasiskrankheiten des Getreides und die Unkrautentwicklung. (Tebrügge, F. & Dreier, M. Hrsg.). Beurteilung von Bodenbearbeitungssystemen hinsichtlich ihrer Arbeitseffekte und deren langfristigen Auswirkungen auf den Boden. Fachverlag Fleck, 225-232
- BRUNOTTE, J. & SOMMER, C. (1994): Konservierende Bodenbearbeitung in der Praxis – Bodenschutz, Technikeinsatz und Kosten. In: Bodenbearbeitung und Bestellung von Großflächen. KTBL-Arbeitspapier 215, 9-17
- BRUNOTTE, J., WAGNER, M. & SOMMER, C. (2001): Bodenschutz und Kosteneinsparung. Landtechnik 56, 132-133
- BUCHHOLZ, K., MÄRLÄNDER, B., THIELECKE, K. & PUKE, H. (1995): Reappraisal of the Braunschweig formula for determination of the technical quality of sugar beets. CITS Proceedings, 97-104
- BÜRCKY, K., & WINNER, C. (1986): Einfluss der Bestandesdichte auf Ertrag und Qualität der Zuckerrübe bei unterschiedlichem Erntetermin. Journal of Agronomy. and Crop Science. 157, 264-272



- CHERVET, A., MAURER, C., STURNY, W.G. & MÜLLER, M. (2005): Direktsaat im Praxisversuch: Einfluss auf die Struktur des Bodens. *Agrarforschung* 8, 12-17
- COELHO, M.B., MATEOS, L. & VILLALOBOS, F.J. (2000): Influence of a compacted loam subsoil layer on growth and yield of irrigated cotton in southern Spain. *Soil and Tillage Research* 57, 129-142
- CZERATZKI, W. (1972): Die Ansprüche der Pflanze an den physikalischen Bodenzustand. *Landbauforschung Völkenrode* 22, 29-36
- DEBRUCK, J. (1997): Gehört der Pflug zum alten Eisen? Lohnunternehmen in der Land und Forstwirtschaft 52, 24-30
- DEXTER, A.R. (1986): Model experiments on the behavior of roots at the interface between a tilled seed-bed and a compacted sub-soil. I. Effects of seed-bed-aggregate size and sub-soil strength on wheat roots. *Plant and Soil* 95, 123-133
- DIECKMANN, J., TOMANOVÁ, O., KOCH, H.-J. & MILLER, H. (2004): Influence of continuous minimum tillage on soil erodibility. *Proc 67. IIRB-Kongreß*, 237-241
- DRAYCOTT, A.P., HULL, R., MESSEM, A.B. & WEBB, D.J. (1970): Effects of soil compaction on Yield and fertilizer requirement of sugar beet. *Journal of Agricultural Science* 75, 533-537
- ECCLESTONE, P. (2001): Minimal tillage. Options for economic sugar beet production. *British Sugar Beet Review* 69, 24-29
- EHLERS, W. & CLAUPEIN, W. (1994): Approaches toward conservation tillage in Germany. In: *Conservation tillage in temperate agroecosystems* (Carter M. R., Hrsg.), Lewis Publishers, Chelsea, Michigan (USA), 141-165
- EHLERS, W. (1983): Auswirkungen der Bodenbelastung mit schwerem Gerät und der Bodenbearbeitung auf das Bodengefüge und das Pflanzenwachstum. *Kali-Briefe (Büntehof)* 16, 499-516
- EHLERS, W. (1996): *Wasser in Boden und Pflanze : Dynamik des Wasserhaushalts als Grundlage von Pflanzenwachstum und Ertrag*. Ulmer, Stuttgart
- EHLERS, W., KÖPKE, U., HESSE, F. & BÖHM, W. (1983): Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soils. *Soil and Tillage Research* 3, 261-275
- EICHHORN, H., GRUBER, W. & GRIEBEL, J. (1991): Bodenbearbeitungs- und Bestellverfahren - ökonomisch betrachtet. *Landtechnik* 46, 39-42
- EPPERLEIN, J. (2001): *Vergleichende Untersuchungen zum Einfluss konservierender Bodenbearbeitung auf ausgewählte biologische und physikalische Bodenparameter im Biosphärenresevat Schorfheide-Chorin*. Dissertation Berlin
- FORSTREUTER, T., (1999): *Bodenfruchtbarkeitskennwerte und Kulturpflanzenertrag in zwei Bodenutzungssystemen*. Dissertation, Göttingen

- FREIBAUER, A., ROUNSEVELL, M.D.A., SMITH, P. & VERHAGEN, J. (2004): Carbon sequestration in the agricultural soils of Europe. *Geoderma* 122, 1-23
- FRIEDRICH, G. & FRANKEN, H. (2003): Landbewirtschaftung und Hochwasserschutz-Vorsorgender Hochwasserschutz durch acker- und pflanzenbauliche Maßnahmen. Landwirtschaftliche Fakultät der Universität Bonn, Schriftenreihe des Lehr- und Forschungsschwerpunktes USL 108
- GEISLER, G.(1969): Einfluß der Sauerstoffkonzentration (O<sub>2</sub>) in der Bodenluft auf das Wurzellängenwachstum und die Trockensubstanzbildung von Mais, Gerste und Ackerbohnen bei verschiedenem Bodenwassergehalt. *Zeitschrift für Acker- und Pflanzenbau* 130, 189-202
- GISI, U., SCHENKER, R., SCHULIN, R., STADELMANN, X.F. & STICHER, H. 1997:
- GLIEMEROTH, G. (1953): Beinigkeit und Wurzelwachstum der Zuckerrübe. *Zucker* 6, 573-578
- HAMMEL, J.E. (1995): Long-term-tillage and crop rotation effects on winter wheat Production in North Idaho. *Agronomy Journal* 87, 16-22
- HANUS, H. & BERNARD, H. (1964): Untersuchungen an Pflugsohlenverdichtungen mit verschiedenen Methoden. *Min. Ernähr., Landw., Forsten NRW, Schriftenreihe Forschung und Beratung, Reihe B, 10, 35-49*
- HARRACH, T. & VORDERBRÜGGE, T.(1991): Die Wurzelentwicklung von Kulturpflanzen in Beziehung zum Bodentyp und Bodengefüge. *Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit. Bd. 2: Bodengefüge, Bereich Landwirtschaft, Sonderheft 204, 69-82*
- HARTGE, K.H. (1965): Die Bestimmung von Porenvolumen und Porengrößenverteilung. *Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung* 6, 193-206
- HOFFMANN, C. (1993): Einfluß der Bodenverdichtung auf Wurzel- und Sproßwachstum sowie die Phosphatversorgung von Zuckerrübe und Getreide. *Dissertation, Göttingen*
- HOFFMANN, C. (1996): Wirkung mehrjährig pflugloser Bodenbearbeitung auf die N-Dynamik im Boden und den Ertrag von Zuckerrüben. *Zuckerindustrie* 121, 616-622
- HORN, R.; STORCK, J. & DEXTER, A.R. (1987): Untersuchungen über den Eindringwiderstand des Bodengefüges für den Eindringwiderstand in Böden. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 150, 342-347
- JAGGARD, K.W. (1977): Effects of soil density on yield and fertilizer requirement of sugar beet. *Annals of applied Biology* 86, 301-312
- KAHNT, G. (1969): Ergebnisse zweijähriger Direktsaatversuche auf drei Bodentypen. *Zeitschrift für Acker- und Pflanzenbau* 129, 277-295

- KNITTEL, H. & STANZEL, H. (1976): Untersuchungen des Bodengefüges mit Penetrometer und Rammsonde. Zeitschrift für Acker- und Pflanzenbau 142, 181-193
- KÖLLER, K. (1994): Gezogene und zapfwellengetriebene Bodenbearbeitung – ein Vergleich. In KTBL-Arbeitspapier 215: Bodenbearbeitung und Bestellung von Großflächen. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL), Darmstadt, 38-46
- KÖNIG, H.-P., KOCH, H.-J. & MÄRLÄNDER, B. (2005): Wirkung von langjährig differenzierter Bodenbearbeitung und N-Düngung auf N-Aufnahme und N-Bilanz einer Zuckerrüben-Wintergetreide-Fruchtfolge. Pflanzenbauwissenschaften 9, 19-28
- LAMPURLANES, J. & CANTERO-MARTINEZ, C. (2003): Soil bulk density and penetration resistance under different tillage and crop management systems and their relationship with barely root growth. Agronomy Journal 95, 526–533
- LIEBHARD, P., EITZINGER, J. & KLAGHOFER, E. (1995): Einfluß der Primärbodenbearbeitung auf Aggregatstabilität und Eindringwiderstand im oberösterreichischen Zentralraum (Teil 5). Die Bodenkultur 46, 1-18
- MÄRLÄNDER, B. & RÖVER, A. (1994): Einfluß von Sorte und Bestandesdichte auf Ertrag und Qualität von Zuckerrüben - ein Beitrag zur Lichtkonkurrenz. Zuckerindustrie 119, 39-47
- MÄRLÄNDER, B. (1991): Zuckerrüben. Optimierung von Anbauverfahren – Züchtungsfortschritt – Sortenwahl. Ute Bernhardt-Pätzold, Stadthagen.
- MÄRLÄNDER, B. (1990): Influence of nitrogen supply on yield and quality of sugar beet. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 153, 327-332
- MASLE, J., FARQUAR, G.D. & GIFFORD, R.M. (1990): Growth and carbon economy of wheat seedlings as affected by soil resistance to penetration. Australian Journal of Plant Physiology 17, 456-487
- MERKES, R., COENEN, H. HESSE, F. & SCHÜTZ, G. (2003): Stand der Produktionstechnik zu Zuckerrüben – Ergebnisse der Umfrage 2002. Zuckerindustrie 128, 425-433
- MOHR, H.D. (1978): Die Durchwurzelung von Böden in Abhängigkeit von wichtigen Bodeneigenschaften. Kali-Briefe 14, 103-113
- PANSE, A., MAIDL, F.X., DENNERT, J., BRUNNER, H. & FISCHBECK, G. (1994): Ertragsbildung von getreidereichen Fruchtfolgen und Getreidemonokulturen in einem extensiven und intensiven Anbausystem. Zeitschrift für Acker- und Pflanzenbau 173, 160-171
- PEKRUN, C., KAUL, H.-P. & CLAUPEIN, W. (2003): Soil Tillage for sustainable nutrient management (Adel El Titi Hrsg.) Soil Tillage in Agroecosystems, CRC Press
- PRINGAS, C., MILLER, H., & KOCH, H.-J. (2002): Auftreten von Pilzparasiten und Ackerschnecken in Winterweizen bei langjährig differenzierter Bodenbearbeitung. Mitt. BBA Berlin-Dahlem 390, 85-86

- RADEMACHER, T. (1990): Der Einfluss von Einbettungs- und Bedeckungswerkzeugen am Zuckerrübeneinzelkornsäugerät auf den Feldaufgang und den Bereinigten Zuckerertrag. Dissertation, Bonn
- RICHARD, G., BOIFFIN, J. & DUVAL, Y. (1995): Direct drilling of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) into a cover crop: effects on soil physical conditions and crop establishment. *Soil and Tillage Research* 34, 169-185
- RÜCKNAGEL, J., HOFMANN, B. & CHRISTEN, O. (2003): Einfluss langjährig unterschiedlicher Bearbeitungsintensität auf physikalische Bodeneigenschaften, Humusgehalt und Wintergerstenertrag. *Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss.* 15, 290-291
- SCHJÖNNING, P. & RASMUSSEN, K.J. (1989): Long-term reduced cultivation. I. Soil strength and stability. *Soil and Tillage Research* 15, 79-90
- SCHLÜTER, K. (2003): Mulchsaat-Praxis MSP - Monoweizen plus Mulchsaat. DLG-Mitteilungen, 11/2003
- STOCKFISCH, N. (1997): Strohabbau durch Mikroorganismen und Regenwürmer in zwei Bodenbearbeitungssystemen. Dissertation, Göttingen
- STOCKFISCH, N., FORSTREUTER, T. & EHLERS, W. (1999): Ploughing effects on soil organic matter after twenty years of conservation tillage in Lower Saxony, Germany. *Soil and Tillage Research* 52, 91-101
- TEIWES, K. (2003): Auswahl repräsentativer Meßfelder auf Versuchsflächen der Südzucker AG; Friemar & Grombach. (persönliche Mitteilung)
- TEIWES, K. (2004): Packungsdichten des Bodens und Auswahl repräsentativer Meßfelder auf Versuchsflächen der Südzucker AG zur Bodenbearbeitung; Friemar, Grombach, Sailtheim & Insultheim.. (persönliche Mitteilung)
- TEIWES, K. (2005): Packungsdichten des Bodens und Auswahl repräsentativer Meßfelder auf Versuchsflächen der Südzucker AG zur Bodenbearbeitung; Sailtheim, Insultheim, Lüttewitz & Zschortau. (persönliche Mitteilung)
- TOMANOVÁ, O., STOCKFISCH, N. & KOCH, H.-J (2006): Einfluss langjährig pflugloser Bodenbearbeitung auf Wachstum und Nährstoffversorgung von Zuckerrüben während der Vegetationsperiode. *Pflanzenbauwissenschaften*, 10, 16-25
- WERNER, D. & PAUL, R. (1999): Kennzeichnung der Verdichtungsgefährdung landwirtschaftlich genutzter Böden. *Wasser & Boden*, 51/52, 10-14
- WILLERT, S.-M. (1994): Strohplazierung bei der Bestellung von Getreide und Raps. *Landtechnik* 49, 232-233
- WEGENER, U. (2001): Dauerhafte Bodenbearbeitungsverfahren in Zuckerrübenfruchtfolgen – Ertragsbildung, Rentabilität, Energiebilanz und Bodenerosion im Vergleich. Dissertation, Göttingen

## **Einfluss langjährig differenzierter Bodenbearbeitung auf chemische Bodeneigenschaften und Zuckerrübenenertrag<sup>2</sup>**

### **Influence of continuous minimum tillage on soil chemical properties and sugar beet yield**

*J. Dieckmann und H.-J. Koch*

#### **Zusammenfassung**

Zu Beginn der 1990er Jahre wurde auf landwirtschaftlichen Großbetrieben ein Bodenbearbeitungsversuch mit langjährig differenziert bearbeiteten, ortsfesten Großparzellen angelegt. In diesen Versuch wurde zwischen 2003 und 2005 eine Studie zum Einfluss differenzierter Bodenbearbeitung auf chemische Bodeneigenschaften und deren Beziehung zum Ertrag von Zuckerrübe integriert. Abnehmende Bearbeitungsintensität vom Verfahren Pflug (25-30 cm tief) über Mulch (10-15 cm tief) bis hin zur Direktsaat führte bei Zuckerrübe zu einem deutlichen Rückgang des Bereinigten Zuckerertrages. Gleichzeitig wurde bei pflugloser Bodenbearbeitung eine Anreicherung von organischem Kohlenstoff ( $C_{org}$ ) und Gesamtstickstoff ( $N_t$ ) sowie ein Anstieg des  $C_{org}/N_t$ -Verhältnisses in der Oberkrume beobachtet. Der Gehalt an pflanzenverfügbarem Magnesium wurde nicht von der Bodenbearbeitung beeinflusst, während bei Phosphor und Kalium eine Anreicherung in der Oberkrume wie bei  $C_{org}$  und  $N_t$  beobachtet wurde. Eine geringfügige Abreicherung im unteren Abschnitt der Krume bei reduzierter Bodenbearbeitung trat nur bei Kalium auf.

Insgesamt belegen die Untersuchungen, dass eine Reduzierung der Bearbeitungsintensität nicht zwangsläufig zu einer eingeschränkten Nährstoffversorgung führt. In den meisten

---

<sup>2</sup> Dieser Artikel wurde bereits veröffentlicht unter DIECKMANN, J. & KOCH, H.-J., 2008: Einfluss langjährig differenzierter Bodenbearbeitung auf chemische Bodeneigenschaften und Zuckerrübenenertrag. Pflanzenbauwissenschaften 12, 22-31.

Umwelten wurde mit den erhöhten Humusgehalten sowie geringfügig höheren Nährstoffgehalten in der Oberkrume des Bodens sogar ein positiver Effekt des Pflugverzichts auf diese Parameter der Bodenfruchtbarkeit beobachtet, der sich tendenziell förderlich auf das Pflanzenwachstum auswirken dürfte. Der Minderertrag von Zuckerrübe bei langjährigem Pflugverzicht ist somit überwiegend auf Veränderungen im Boden zurückzuführen, die nicht ursächlich mit unzureichender Nährstoffversorgung zusammenhängen.

### **Summary**

In the beginning of the 1990th a large-scale field trial with permanent plots on arable farms in Germany was established to determine the effect of various tillage systems (mouldboard ploughing (25-30 cm deep), conservation tillage with a rigid tine cultivator (10-15 cm deep), direct drilling) on crop growth. In 2003-2005 the effect of tillage treatments on soil chemical properties and sugar beet yield was investigated. Reduction of tillage intensity significantly decreased white sugar yield. However, with conservation tillage and direct drilling concentration of soil organic carbon ( $C_{org}$ ), soil nitrogen ( $N_t$ ) and  $C_{org}/N_t$ -ratio increased in the upper layer of the topsoil, but remained unaffected in the lower topsoil and subsoil. Similarly, plant available P and K was accumulated in the upper topsoil, but K slightly decreased in lower topsoil horizon. Mg was not influenced by tillage treatments.

This investigation shows, that conservation tillage and direct drilling do not necessarily limit nutrient supply of crops compared to mouldboard ploughing. On the contrary, higher humus and nutrient concentrations found in the upper topsoil of several sites may indicate enhanced soil fertility and, moreover, improved conditions for plant growth with ploughless tillage. Obviously, yield reductions in sugar beet going along with reduced tillage are caused by alterations of soil properties other than nutrient status.

**Schlagwörter:** Zuckerrübe, Bodenbearbeitung, Direktsaat, Nährstoffe, P, K, Mg, C<sub>org</sub>, N<sub>t</sub>, C<sub>org</sub>/N<sub>t</sub>-Verhältnis

**Key words:** Sugar beet, soil tillage, direct drilling, nutrients, P, K, Mg, C<sub>org</sub>, N<sub>t</sub>, C<sub>org</sub>/N<sub>t</sub>-ratio

## 1 Einleitung

Pfluglose Bodenbearbeitungsverfahren haben in den vergangenen Jahren in rasch steigendem Ausmaß Einzug in die landwirtschaftliche Praxis gehalten (MERKES et al. 2003, BECKER 2003). Gemeinsam ist ihnen der Einsatz mischend an Stelle wendend arbeitender Geräte, während Intensität und Tiefe des Eingriffs in die Krume sehr variabel sind. Neben zahlreichen ökologischen Vorteilen, wie z.B. der Verminderung des Erosionsrisikos (SCHMIDT et al. 2002), der Steigerung der Biodiversität (KREUTER 2006) sowie der Erhaltung bzw. Erhöhung der Bodenfruchtbarkeit (CAPRIEL 2005), bieten konservierende Bodenbearbeitung und Direktsaat das Potential, durch verminderte Kosten den Deckungsbeitrag zu steigern (DIECKMANN et al. 2006). Voraussetzungen für den ökonomischen Erfolg reduzierter Bearbeitungsverfahren und ihre Akzeptanz in der Praxis sind neben geringeren Produktionskosten hohe Erträge sowie Qualitäten des Erntegutes (DIETSCH 2003).

Für den Anbau von Wintergetreide sind pfluglose Bodenbearbeitungsverfahren optimiert und etabliert (EPPERLEIN 2001), was von zahlreichen Autoren in Versuchen mit Ertragsgleichheit oder sogar Ertragssteigerung bei konservierender gegenüber pflügender Bodenbearbeitung dokumentiert wurde (KAHNT 1969, SCHLÜTER 2003, CHERVET et al. 2005, DIECKMANN et al. 2006). Demgegenüber reagiert die Zuckerrübe auf eine reduzierte Bearbeitungsintensität oft mit Mindererträgen (HOFFMANN 1997, KÖNIG et al. 2005). Vor allem der vollständige Verzicht auf Bodenbearbeitung (Direktsaat) führt häufig zu einem deutlichen Ertragsverlust gegenüber einer Bearbeitung mit dem Pflug (WALDORF &

SCHULZE 2003, LÜTKE-ENTRUP et al. 2003). Eine Ursache für Mindererträge von pfluglos bestellten Zuckerrüben kann bei nahezu vollständigem Verzicht auf Lockerung das Über- bzw. Unterschreiten des für das Pflanzenwachstum optimalen Lagerungsdichte- bzw. Porenvolumenbereiches sein (HARRACH & VORDERBRÜGGE 1991). Auch der in der vorliegenden Versuchsserie regelmäßig aufgetretene Minderertrag von Zuckerrüben korrelierte mit einer aus erhöhten Lagerungsdichten und verminderte Porenvolumen hervorgegangenen Degradation der Bodenstruktur in der ehemals bearbeiteten Krume (DIECKMANN et al. 2006).

Neben bodenphysikalischen Kenngrößen verändert die Bodenbearbeitung aber auch biologische und chemische Eigenschaften und kann so ebenfalls die Ertragsbildung der Feldfrüchte beeinflussen (DEXTER 2004). So berichten KAHNT (1971), EHLERS et al. (1972), DREW & SAKER (1978, 1980), KNITTEL et al. (1985), SARRANTONIO & SCOTT (1988), PEKRUN et al. (2003) und VAMERALI et al. (2003) bei vollständigem Verzicht auf Bodenbearbeitung bzw. stark reduzierter Eingriffsintensität von einer Anreicherung der Nährstoffe P, K, Mg und einer Erhöhung des pH-Werts an der Bodenoberfläche, die mit einer deutlichen Abreicherung in tieferen Schichten der Krume einhergeht. Geringe Wassergehalte können insbesondere in den Sommermonaten im Oberboden die Diffusionsraten der Nährstoffe zu den Pflanzenwurzeln senken (ENGELS et al. 1994). Somit kann eine Umverteilung von Nährstoffen mit höheren Konzentrationen in der austrocknungsgefährdeten Oberkrume deren Verfügbarkeit für die Pflanzenwurzeln zeitweise einschränken und sich negativ auf das Pflanzenwachstum auswirken (FOY 1992, SHARPLEY et al. 1992, THOMAS et al. 2006).

Durch die verminderte Einmischung in tiefere Bodenschichten konzentriert sich bei konservierender Bodenbearbeitung/Direktsaat darüber hinaus auch organische Bodensubstanz an der Bodenoberfläche (BECKER 2003, THOMAS et al. 2006). Eine Humusanreicherung in der obersten Bodenschicht kann wiederum die Mineralisation von Stickstoff zumindest zeitweilig vermindern (FRANZLUEBBERS & ARSHAD 1996, SILGRAM &



SHEPHERD 1999). Sofern die niedrigere N-Nachlieferung des Bodens nicht durch eine erhöhte N-Düngung kompensiert wird, können niedrigere Erträge nach reduzierter Bodenbearbeitung im Vergleich zur Pflugbearbeitung die Folge sein (KNITTEL et al. 1985, LIEBMAN et al. 1995).

Vor diesem Hintergrund wurde in der vorliegenden Arbeit der Frage nachgegangen, ob der Minderertrag von Zuckerrüben bei langjährig pflugloser Bodenbearbeitung durch Veränderungen in den chemischen Bodeneigenschaften und der Nährstoffverfügbarkeit bedingt ist. Dazu wurden in einem Zeitraum von drei Jahren an fünf Standorten eines Langzeitbodenbearbeitungsversuches detaillierte Untersuchungen zum Nährstoffstatus des Bodens sowie dem Ertrag von Zuckerrüben durchgeführt.

## **2 Material und Methoden**

### **2.1 Standorte und Bodenbearbeitung**

Zu Beginn der 90er Jahre wurden auf Flächen des Geschäftsbereichs Landwirtschaft der Südzucker AG in typischen Ackerbauregionen Süd- und Ostdeutschlands großflächige Bodenbearbeitungsversuche angelegt. An jedem Standort wurde ein möglichst homogener Schlag in etwa gleich große, ortsfeste Großparzellen mit einer Größe zwischen 2,5 und 8 ha unterteilt. In den Jahren 2003-2005 erfolgten an ausgewählten Standorten dieser Versuchsserie Untersuchungen zu den chemischen Bodeneigenschaften der Flächen. Dabei wurde der Standort Friemar in 2003, die Standorte Sailtheim und Insultheim in 2004 und die Standorte Lüttewitz und Zschortau in 2005 beprobt (Abb. 1).

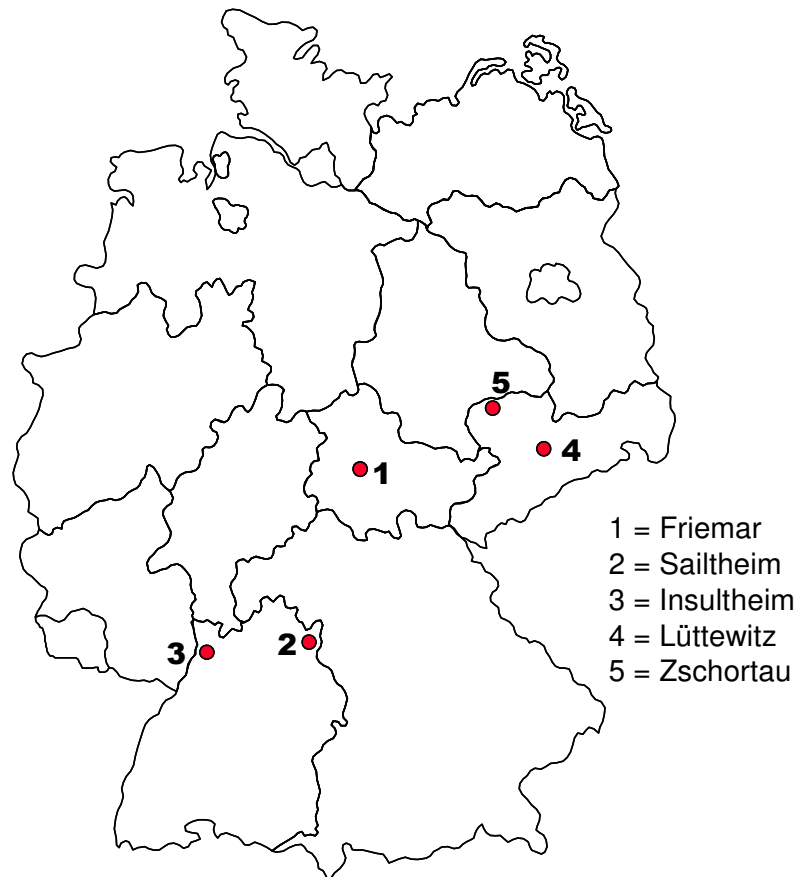


Abb. 1: Lage der Versuchsstandorte  
*Location of the experimental sites*

Neben einer konventionellen Variante „Pflug“ mit einer jährlichen Herbstfurche auf Krumentiefe (25–30 cm) wurde das konservierend bearbeitete Verfahren „Mulch“ angelegt (Abb. 2). In der Variante Mulch erfolgte keine wendende Bodenbearbeitung, sondern lediglich eine mischende Bodenbearbeitung mit einem Grubber bei einer maximalen Eingriffsintensität von ca. 10-15 cm. Weiterhin wurde ein Verfahren Direktsaat eingerichtet, das zunächst gänzlich ohne Bodenbearbeitung durchgeführt wurde. In den ersten Versuchsjahren misslang jedoch in diesem Verfahren wiederholt die Bestandesetablierung bei Zuckerrüben aufgrund mangelnder Bedeckung des Saatgutes mit feinkrümeligem Boden. Dies führte zu unzureichenden Bestandesdichten. Deshalb wurde ab 1996 im Verfahren Direktsaat an allen Standorten eine flache Bodenbearbeitung (max. 3-5 cm tief) zur Aussaat der Zuckerrüben eingeführt.

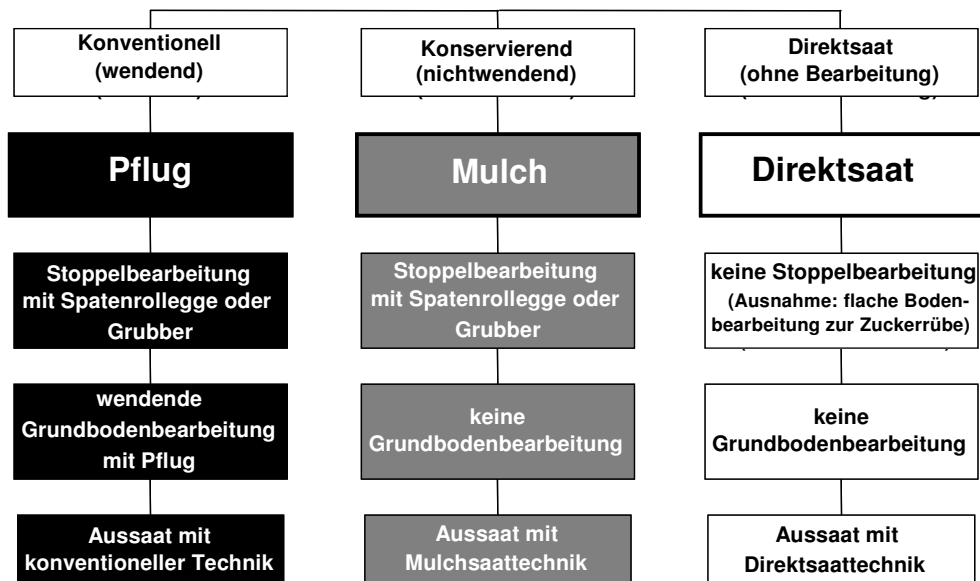


Abb. 2: *Bodenbearbeitungsverfahren – Definition und Verfahrensablauf*

Soil tillage operations of treatments – definition and process flow

Die Bodenbearbeitung wurde mit herkömmlichen Maschinen aus den beteiligten landwirtschaftlichen Betrieben durchgeführt. Je nach Maschinenausstattung der Betriebe und spezifischer Notwendigkeit in Abhängigkeit vom Bodenzustand wurden auf den Standorten unterschiedliche Geräte zur Stoppelbearbeitung (Spatenrollegge, Scheibenegge, Schwergrubber) eingesetzt. Bei der Aussaat der Zuckerrüben kamen ausschließlich Einzelkornsägeräte mit Mulchsaateinrichtung der Firmen Kleine und Accord zum Einsatz.

## 2.2 Pflanzenbauliche Maßnahmen

Die Fruchtfolge auf den Versuchsstandorten war dreifeldrig: Auf Zuckerrüben, die generell nach einer Zwischenfrucht angebaut wurden, folgte ein zweimaliger Anbau von Winterweizen. Die Aussaatstärke wurde an die Bodenbearbeitungsverfahren angepasst.

Da erfahrungsgemäß ein niedriger Feldaufgang bei Zuckerrübe im Verfahren Direktsaat zu erwarten war, wurde in diesem Verfahren die Ablageentfernung gegenüber den anderen Verfahren um 2 cm verringert (in der Regel auf 17 cm).

Der Pflanzenschutz wurde betriebsüblich nach guter fachlicher Praxis und in den Bearbeitungsvarianten soweit wie möglich einheitlich durchgeführt. Eine verfahrensspezifische Differenzierung wurde im Bedarfsfall beim Einsatz von Herbiziden, Molluskiziden und Rodentiziden vorgenommen.

Grunddüngung und mineralische Stickstoffdüngung erfolgten in Anlehnung an die EUF-Düngeempfehlung in gleicher Aufwandmenge über alle Bodenbearbeitungsvarianten eines Standortes, wobei die Höhe zu Zuckerrüben zwischen 50 und 120 kg N ha<sup>-1</sup> lag.

### **2.3 Chemische Bodenuntersuchung**

Um den Einfluss der unterschiedlichen Bodenbearbeitungssysteme auf bodenchemische Eigenschaften erfassen zu können, wurde in jeder Bodenbearbeitungsparzelle eines Standortes ein Messareal von 40 m x 40 m ausgewiesen. Diese Messareale sollten möglichst geringe Unterschiede in ihren bodentypologischen und bodenartlichen Eigenschaften innerhalb eines Standortes aufweisen. Dabei wurde insbesondere der Bereich von 0-45 cm Bodentiefe betrachtet. In den ausgewiesenen Messarealen wurde nachträglich die Textur bestimmt, indem aus einer Profilgrube, die an den Rändern einer für das Messareal repräsentativen Stelle angelegt wurde, je eine Mischprobe homogenisierten Bodens aus den Tiefenbereichen 3-7 cm, 13-18 cm, 23-27 cm und 38-43 cm entnommen wurde. An diesen Proben wurde die Textur der Feinerde (Korngröße < 2,0 mm) mittels Nasssiebung für die Sandfraktionen und mittels Pipettmethode nach Köhn (SCHLICHTING et al. 1995) für die Schluff- und Tonfraktionen bestimmt. Bei der Pipettanalyse kam der "SEDIMAT 4-12" (Umwelt-Geräte-Technik GmbH, Müncheberg, Deutschland) zum Einsatz.

Für die chemische Bodenanalyse wurden die Messareale zunächst in vier Quadranten mit einer Größe von 10 m x 10 m unterteilt. Drei der vier Quadranten wurden im Frühjahr vor der Zuckerrübenaussaat mit je 60 Pürkhauer-Einstichen bis 45 cm Bodentiefe beprobt. Die Proben wurden unterteilt in die Tiefenbereiche 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm und 30-45 cm und zu homogenisierten Mischproben zusammengefasst. Zur Bestimmung des Gesamtkohlenstoffes ( $C_t$ ) und des Gesamtstickstoffes ( $N_t$ ) wurden die Proben getrocknet und mit einer Kugelmühle pulverisiert. Anschließend wurden die  $C_t$ - und  $N_t$ -Gehalte durch trockene Veraschung bei 1200 °C bestimmt, indem die Anteile an  $CO_2$  und  $N_2$  aus der Verbrennung gaschromatographisch getrennt und gemessen wurden (vario EL, Elementar Analysensysteme GmbH, Hanau, Deutschland). Der Gehalt an carbonatbürtigem Kohlenstoff ( $C_{carb}$ ) wurde in der Scheibler-Apparatur durch Austreiben des  $CO_2$  mit Salzsäure und dessen gasvolumetrische Messung ermittelt. Der organische Kohlenstoff ( $C_{org}$ ) wurde aus der Differenz zwischen  $C_t$  und  $C_{carb}$  berechnet.

Die Analyse von pH-Wert und Magnesium-Gehalt erfolgte aus dem Calciumchlorid-Auszug ( $Mg_{CaCl_2}$ ), die von Phosphor und Kalium aus dem CAL-Auszug ( $P_{CAL}$ ,  $K_{CAL}$ ). Die Nährstoffgehalte in den Extrakten wurden anschließend spektralphotometrisch bzw. mit Flammen-Emissions-Spektrometrie bestimmt (ANONYMUS 2004).

Sämtliche Gehalte wurden in mg elementarem Nährstoff je 100 g Boden angegeben. In den Abbildungen zu den Grundnährstoffen wurden zusätzlich die Gehaltsklassen gemäß Einstufung durch die LUFA Augustenberg angegeben (ANONYMUS 2002). Dabei entsprechen zu geringe Gehalte den Gehaltsklassen A und B. Optimale bzw. überhöhte Nährstoffversorgung liegt in den Gehaltsklassen C bzw. D und E vor. Für die Nährstoffe Kalium und Magnesium wurde zwischen den mittelschweren Standorten Sailtheim, Lüttewitz und Zschortau (Tongehalt 12–25%) sowie den schweren Standorten Friemar und Insultheim (Tongehalt >25%) bei der Einteilung der Gehaltsklassen differenziert. Bei

Darstellung des Mittelwertes über die Standorte wurden die Gehaltsklassen für mittelschwere Standorte angegeben.

## **2.4 Ernte und Qualitätsanalyse**

In Zuckerrüben wurden innerhalb jedes Messareals Parzellen mit unterschiedlicher Bestandesdichte (53.000, 65.000 und 83.000 Pflanzen ha<sup>-1</sup>) in vierfacher Wiederholung als Blockanlage durch Vereinzeln von Hand angelegt. Die eingestellten Bestandesdichteunterschiede spiegeln häufig im Feld anzutreffende Pflanzendichten wider. Dabei wurden nach dem Zufallsprinzip möglichst gleichmäßig Lücken 1. und 2. Ordnung (innerhalb einer Reihe fehlten maximal ein bzw. zwei Pflanzen in Folge) eingefügt. Von den sechs Reihen (45 cm Abstand) einer Parzelle (2,7 m breit x 8 m lang) wurden kurz vor der Großparzellenernte die mittleren drei Reihen von Hand gerodet (10,8 m<sup>2</sup>). Neben dem Gewicht wurde die technische Qualität der Rüben an repräsentativen Teilproben bestimmt. Die Analyse der Parameter der technischen Qualität wurde unter standardisierten Bedingungen nach HOFFMANN (2006) durchgeführt. Die Berechnung des Standardmelasseverlustes und des Bereinigten Zuckerertrages (BZE) erfolgten nach MÄRLÄNDER et al. (2003). Nachfolgend werden ausschließlich Mittelwerte dargestellt, da die Interaktion zwischen Bodenbearbeitung und Bestandesdichte nicht signifikant war (DIECKMANN et al. 2006).

## **2.5 Statistische Auswertung**

Die statistische Auswertung erfolgte mit dem Softwarepaket SAS (Version 8.1, SAS Inc., N.C., USA). Tests auf Normalverteilung wurden mit der Prozedur UNIVARIATE (DUFNER et al. 2002) durchgeführt. Nicht normalverteilte Daten wurden mit dem Box-Cox-Macro transformiert, um eine Normalverteilung zu erreichen (ANONYMUS 2006). Die Varianzanalyse wurde mit der Prozedur MIXED durchgeführt. Die Wirkung der

Bodenbearbeitung wurde mit der Kombination Standort/Jahr (Umwelt) als unabhängige Wiederholungen geprüft. Die Umwelten und alle Interaktionen wurden als zufällige Effekte modelliert. Der statistische Vergleich von Bearbeitungseffekten erfolgt getrennt nach den Beprobungstiefen mit dem Tukey-Test bei  $p \leq 5\%$ .

Um die Ursachen der Ertragswirkung der Bodenbearbeitung aufzuklären, wurden die Erträge um das Ortsmittel bereinigt. Die daraus entstandenen Differenzerträge zum jeweiligen Standortmittel wurden mittels einfacher Regression durch die Prozedur REG mit den chemischen Bodenparametern korreliert.

### **3 Ergebnisse**

#### **3.1 Texturanalyse**

Um festzustellen, ob die im Vorfeld zu den Bodenuntersuchungen festgelegten Messareale hinsichtlich ihrer bodentypologischen und bodenartlichen Eigenschaften vergleichbar sind, wurde eine Texturanalyse durchgeführt. Diese ergab, dass an den Standorten Friemar, Sailtheim und Zschortau die Korngrößenverteilung in den unterschiedlichen Bearbeitungsvarianten sehr einheitlich war (Tab. 1). In Insultheim waren die Ton- und Feinschluffgehalte im Messareal der gepflügten Variante in Krume und Unterboden deutlich höher als in den konservierend bearbeiteten Varianten. Damit einhergehend waren die Sandgehalte im Verfahren Pflug niedriger. Am Standort Lüttewitz war der Tongehalt im Unterboden der Variante Mulch gegenüber den anderen Varianten erhöht.

Tab. 1: Textur des Bodens in Krume (3-27cm) und Unterboden (38-43 cm), analysiert wurde Boden aus repräsentativen Profilgruben (5 Versuchsstandorte, 2003-2005)

*Soil texture in topsoil (3-27 cm) and subsoil (38-43 cm), data result from representative pits (5 experimental sites, 2003-2005)*

Standort und Jahr	Boden- bearbeitung	Tiefe	Boden- art*	Ton	Fein- Grob- und schluff Mittelschluff Sand [g 100g <sup>-1</sup> ]		
					Fein- schluff	Mittelschluff	Sand
<b>Friemar 2003</b>	Pflug	Krume	Tu4	29,6	7,1	60,6	2,8
		Unterboden	Tu4	29,3	6,4	61,0	3,3
	Direktsaat	Krume	Tu4	29,0	7,6	60,4	3,0
		Unterboden	Tu4	31,3	7,8	58,1	2,8
		Krume	Tu4	27,6	6,6	63,1	2,8
		Unterboden	Tu4	27,1	5,4	64,3	3,2
<b>Sailtheim 2004</b>	Pflug	Krume	Ut4	20,4	9,9	66,0	3,6
		Unterboden	Tu4	31,5	8,4	58,3	1,9
	Direktsaat	Krume	Ut4	17,5	8,5	71,0	2,9
		Unterboden	Tu4	31,4	8,4	58,4	1,7
		Krume	Ut4	22,0	9,4	66,2	2,4
		Unterboden	Tu4	33,6	8,8	55,7	1,9
<b>Insultheim 2004</b>	Pflug	Krume	Lt3	35,9	14,7	34,8	14,6
		Unterboden	Lt3	38,4	14,1	33,3	14,2
	Direktsaat	Krume	Lu	29,5	10,4	40,8	19,3
		Unterboden	Lu	28,6	10,5	41,7	19,1
		Krume	Lu	29,1	12,1	38,4	20,4
		Unterboden	Lu	24,3	8,8	42,1	24,8
<b>Lüttewitz 2005</b>	Pflug	Krume	Ut3	13,5	4,9	77,6	3,9
		Unterboden	Ut3	15,5	5,5	76,3	2,7
	Direktsaat	Krume	Ut3	14,9	5,8	76,7	2,7
		Unterboden	Ut3	20,9	5,7	71,1	2,3
		Krume	Ut3	13,9	5,6	76,9	3,7
		Unterboden	Ut3	14,0	6,6	77,4	2,0
<b>Zschortau 2005</b>	Pflug	Krume	Uls	16,5	6,7	48,1	28,7
		Unterboden	Uls	16,9	6,5	48,9	27,7
	Direktsaat	Krume	Uls	12,5	5,2	46,0	36,4
		Unterboden	Uls	12,5	5,3	47,2	35,0
		Krume	Uls	13,4	5,1	47,4	34,1
		Unterboden	Slu	14,4	5,1	44,9	35,7

\* nach Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Boden 2005

### 3.2 Ertrag

Der BZE variierte zwischen den Umwelten von mehr als 12 t ha<sup>-1</sup> in Friemar 2003 bis zu etwa 6 t ha<sup>-1</sup> in Insultheim 2004 (Mittel der Bearbeitungsvarianten, nicht dargestellt). Im Mittel der Umwelten sank der BZE mit abnehmender Bearbeitungsintensität von



10,36 t ha<sup>-1</sup> im Verfahren Pflug auf 10,05 t ha<sup>-1</sup> im Verfahren Mulch und 9,06 t ha<sup>-1</sup> im Verfahren Direktsaat (nicht dargestellt). Der Ertragsunterschied des Verfahrens Direktsaat zu den Systemen Pflug und Mulch war signifikant, während die Erträge der Verfahren Pflug und Mulch nicht signifikant verschieden waren.

### **3.3 C<sub>org</sub>, N<sub>t</sub> und C<sub>org</sub>/N<sub>t</sub>-Verhältnis**

Im Mittel aller Bearbeitungsvarianten und Beprobungstiefen war der C<sub>org</sub>-Gehalt in Insultheim 2004 mit ca. 2 % am höchsten und in Sailtheim 2004 und Zschortau 2004 mit ca. 1 % am niedrigsten (nicht dargestellt). Im Mittel der Umwelten führte reduzierte Bodenbearbeitung mit abnehmender Intensität zu einer signifikanten Anreicherung von C<sub>org</sub> in der Oberkrume (0-10 cm, Abb. 3 links). Der C<sub>org</sub>-Gehalt lag im Verfahren Mulch um 0,3 % und bei Direktsaat um 0,5 % über dem des Systems Pflug. In den darunter liegenden Bodenschichten unterschieden sich die Varianten nicht signifikant voneinander. In der mittleren und unteren Krume (10-30 cm) lagen die Werte in den Verfahren Mulch und Direktsaat niedriger als in der Oberkrume. Bei Pflugbearbeitung war der C<sub>org</sub>-Gehalt demgegenüber in der gesamten Krume einheitlich. Die niedrigsten C<sub>org</sub>-Gehalte traten in allen Verfahren im Unterboden (30-45 cm) auf.

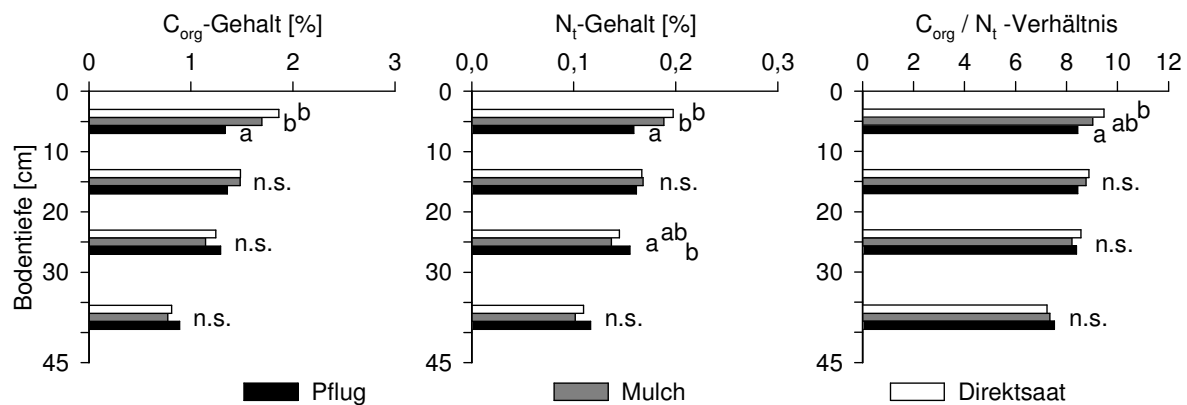


Abb. 3: Organischer Kohlenstoffgehalt ( $C_{org}$ , links), Gesamtstickstoffgehalt ( $N_t$ , Mitte) und  $C_{org}/N_t$  -Verhältnis (rechts) in Krume (0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm) und Unterboden (30-45 cm) nach langjährig differenzierter Bodenbearbeitung, Mittel über fünf Umwelten; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Tiefe,  $p \leq 0,05$ , Tukey-Test, n.s. = nicht signifikant

*Effect of soil tillage on the concentration of soil organic carbon ( $C_{org}$ , left), total soil nitrogen ( $N_t$ , middle) and  $C_{org}/N_t$ -ratio (right) in topsoil (0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm) and subsoil (30-45 cm), means of five environments; different letters indicate significant differences within one depth,  $p \leq 0,05$ , Tukey-Test, n.s. = not significant*

Der  $N_t$ -Gehalt zeigte eine sehr ähnliche Abstufung wie der  $C_{org}$ -Gehalt in Abhängigkeit von Umwelt und Bodenbearbeitung. Eine wesentliche bearbeitungsspezifische Differenzierung war in der Oberkrume zu verzeichnen: Hier stieg der  $N_t$ -Gehalt mit abnehmender Bearbeitungsintensität an (Abb. 3, Mitte). Beim  $C_{org}/N_t$ -Verhältnisses traten geringe Unterschiede auf. Abnehmende Bearbeitungsintensität führte zu einem Anstieg des  $C_{org}/N_t$ -Verhältnisses in der Oberkrume (Abb. 3, rechts).

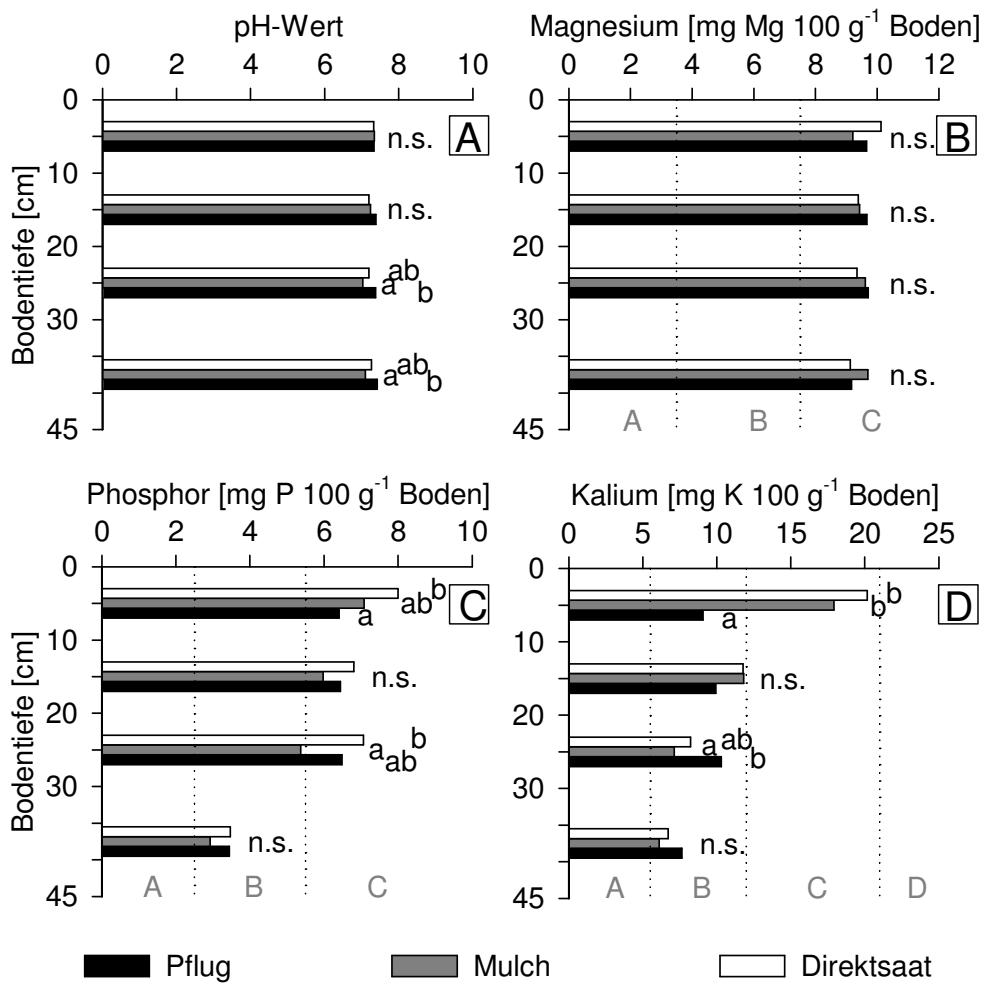


Abb. 4: pH-Wert (A) und Gehalt an pflanzenverfügbarem Magnesium (B), Phosphor (C) und Kalium (D) in Krume (0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm) und Unterboden (30-45 cm) nach langjährig differenzierter Bodenbearbeitung, Mittel über fünf Umwelten; Großbuchstaben kennzeichnen den Versorgungszustand des Bodens nach ANONYMUS (2002) für mittelschwere Standorte; unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Tiefe,  $p \leq 0,05$ , Tukey-Test, n.s. = nicht signifikant

*Effect of soil tillage on pH (A) and the concentration of plant available magnesium (B), phosphorus (C) and potassium (D) in topsoil (0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm) and subsoil (30-45 cm), means of five environments; upper-case letters indicate soil nutrient status according to ANONYMUS (2002) for medium textured soils, lower-case letters indicate significant differences within one depth,  $p \leq 0,05$ , Tukey-Test, n.s. = not significant*

### 3.4 pH-Wert

Der pH-Wert lag in allen Umwelten im optimalen Bereich zwischen 7,0 und 7,5 (Abb. 4 A). Während in der Oberkrume keine Differenzierung zwischen den Bearbeitungsvarianten auftrat, zeigten sich mit zunehmender Bodentiefe Unterschiede im pH-Wert. Im Verfahren Pflug lag der pH-Wert über den gesamten Untersuchungsbereich konstant bei 7,4, während er in den pfluglosen Verfahren in den unteren Bodenschichten bis auf 7,0 abnahm (Mulch). In Unterkrume und Unterboden war der Unterschied zwischen den Bearbeitungsverfahren Pflug und Mulch signifikant, Direktsaat wies mittlere Werte auf.

### 3.5 Magnesium

Der Gehalt an  $Mg_{CaCl_2}$  lag im Mittel der Umwelten und Bodenbearbeitungsverfahren in der Gehaltsklasse C (7,5– 3,5 mg  $Mg_{CaCl_2}$  100 g<sup>-1</sup> Boden; Abb. 4 B). Dabei traten vergleichsweise große, ungerichtete Unterschiede zwischen den Umwelten auf (nicht dargestellt). Im Mittel der Umwelten wurde kein signifikanter Effekt der Bodenbearbeitung auf den Gehalt an pflanzenverfügbarem Magnesium gemessen.

### 3.6 Phosphor

Im Mittel der Umwelten und Bearbeitungsverfahren lag der Gehalt an  $P_{CAL}$  in der Krume im unteren Bereich der Gehaltsklasse C (5,5-10,5 mg  $P_{CAL}$  100 g<sup>-1</sup> Boden; Abb. 4 C). Niedrige  $P_{CAL}$ -Gehalte wurden vor allem in den Umwelten Friemar 2003 (ca. 4 mg  $P_{CAL}$  100 g<sup>-1</sup> Boden) und Lüttewitz 2005 (ca. 6 mg  $P_{CAL}$  100 g<sup>-1</sup> Boden) gemessen. In 0-10 cm Tiefe war ein signifikanter Anstieg des  $P_{CAL}$ -Gehaltes mit abnehmender Bearbeitungsintensität zu beobachten. In Mittel- und Unterkrume traten keine gerichteten Effekte der Bodenbearbeitung mit gegenüber ohne Pflug auf. Auffällig war, dass im Verfahren Mulch in allen Bodenschichten mit Ausnahme der Oberkrume deutlich niedrigere  $P_{CAL}$ -Gehalte vorlagen. Gegenüber Direktsaat war dieser Unterschied in der Unterkrume signifikant.

Während in den Verfahren Direktsaat und Mulch der  $P_{\text{CAL}}$ -Gehalt von der Ober- bis zur Unterkrume tendenziell sank, war er im System Pflug in allen Schichten einheitlich. Im Unterboden war der  $P_{\text{CAL}}$ -Gehalt deutlich geringer als in der Krume und unterschied sich zwischen den Bearbeitungsverfahren nicht.

In den einzelnen Umwelten differierte das Niveau der  $P_{\text{CAL}}$ -Gehalte zwischen den Bearbeitungsvarianten teilweise beträchtlich, ohne dass ein gerichteter Effekt sichtbar wurde (nicht dargestellt).

### 3.7 Kalium

Im Unterschied zur P-Versorgung lagen die Gehalte an pflanzenverfügbarem Kalium ( $K_{\text{CAL}}$ ) im Mittel der Umwelten überwiegend im Bereich der Gehaltsklasse B (5,5-12 mg  $K_{\text{CAL}}$  100 g<sup>-1</sup> Boden; Abb. 4 D). Auffällige Unterschiede zwischen den Umwelten existierten dabei nicht (nicht dargestellt). Im Mittel der Umwelten stieg der  $K_{\text{CAL}}$ -Gehalt mit abnehmender Bearbeitungsintensität in der Oberkrume an (Abb. 4 D). In der Unterkrume lag der  $K_{\text{CAL}}$ -Gehalt im Boden der Variante Pflug tendenziell höher als in der Variante Direktsaat und signifikant höher als in der Variante Mulch. In den Verfahren Direktsaat und Mulch war ein ausgeprägter Tiefengradient mit sinkenden Werten von der Oberkrume bis zum Unterboden vorhanden, während im System Pflug die Werte in allen Schichten der Krume gleich waren und zum Unterboden hin deutlich abfielen.

### 3.8 Korrelationen zwischen Nährstoffgehalt und Ertrag

Die Gehalte der untersuchten pflanzenverfügbaren Nährstoffe korrelierten in allen Bodenschichten negativ mit dem Ertrag (nicht dargestellt). Die engsten Korrelationen waren bei Kalium und Phosphor in den Tiefen 0-10 cm und 0-30 cm zu finden ( $r$  zwischen -0,17 und -0,5). Mit steigendem Nährstoffgehalt nahm der Bereinigte Zuckerertrag der Zuckerrüben ab.

#### 4 Diskussion

Langjährig differenzierte Bodenbearbeitung führt zu erheblichen Veränderungen im System Boden/Pflanze (PEKRUN et al. 2003). Eine Reduzierung der Bearbeitungsintensität von Pflug über Mulch bis hin zur Direktsaat beeinflusst in unterschiedlicher Weise ein breites Spektrum von Kenngrößen des Bodens und damit letztendlich auch Wachstum und Ertrag der Kulturpflanzen. So führt konservierende Bodenbearbeitung in der Praxis bei Wintergetreide und Winterraps oft zu gleichen oder sogar höheren Erträgen, während beim Anbau von Zuckerrübe der Ertrag deutlich geringer sein kann als bei konventioneller Bearbeitung (KNITTEL et al. 1985, MEIER et al. 1993, LIEBHARD 1997, AHL et al. 1998, TOMANOVÁ et al. 2006). Vor allem der vollständige Verzicht auf Bodenbearbeitung (Direktsaat) kann bei Zuckerrübe zu einem deutlichen Minderertrag führen (LÜTKE-ENTRUP et al. 2003, WALDORF & SCHULZE 2003), wie er auch in der vorliegenden Versuchsserie durchgängig an allen Standorten gemessen wurde. Aber auch im Verfahren Mulch war der BZE an drei von fünf Versuchsstandorten niedriger als im Verfahren Pflug. Die Ergebnisse der Handernte zeigen somit eindeutig, dass die Bodenbearbeitung einen erheblichen Einfluss auf das Wachstum von Zuckerrüben hat.

Als eine mögliche Ursache für bodenbearbeitungsbedingte Mindererträge wurden von DIECKMANN et al. (2006) veränderte bodenphysikalische Eigenschaften wie erhöhte Trockenrohdichte, erhöhter Eindringwiderstand sowie eine geringere Luftkapazität bei reduzierter Bodenbearbeitung, insbesondere bei Direktsaat, vorgeschlagen. Neben biologischen und physikalischen Eigenschaften wird durch Bodenbearbeitung aber auch ein breites Spektrum an chemischen Eigenschaften mit großer Bedeutung für die Bodenfruchtbarkeit beeinflusst (DEXTER 2004). Ob die physikalischen Veränderungen der Bodenstruktur allein das Wachstum der Zuckerrüben beeinflussten, oder ob zusätzlich chemische Veränderungen im Boden Ursache für Ertragsunterschiede sind, war Gegenstand der vorliegenden Untersuchung. Trotz der teilweise beträchtlichen räumlichen

Distanzen zwischen den Messarealen (50-100 m) waren dabei die Unterschiede zwischen den Böden der Bearbeitungsvarianten am jeweiligen Standort hinsichtlich Bodentyp und -art so gering, so dass eine Überlagerung verfahrensspezifischer Effekte auf die Messgrößen durch Unterschiede in den Bodeneigenschaften nicht anzunehmen ist.

#### **4.1 C<sub>org</sub>, N<sub>t</sub> und C<sub>org</sub>/N<sub>t</sub>-Verhältnis**

Der C<sub>org</sub>-Gehalt wird unmittelbar vom Anteil an Ton und Feinschluff im Boden beeinflusst. Mit steigendem Feinbodenanteil nimmt der Gehalt an C<sub>org</sub> zu (DENEFF et al. 2004, PLANTE et al. 2006). Auch im vorliegenden Versuch wurden an den Standorten mit höheren Ton- und Feinschluffgehalten höhere C<sub>org</sub>-Gehalte gemessen.

Die Anreicherung von organischer Substanz in der Oberkrume bei langjährig reduzierter Bodenbearbeitung, wie sie im vorliegenden Versuch gemessen wurde (Abb. 3 A), beobachteten unter anderem auch RASMUSSEN (1999), STOCKFISCH et al. (1999) und WILLIAMS et al. (2005). Dabei wirkt sich ein erhöhter Humusgehalt als langsam fließende Nährstoffquelle im Allgemeinen positiv auf die Bodenfruchtbarkeit und somit förderlich für das Wachstum der Kulturpflanze aus. Weiterhin werden Luft- und Wasserhaushalt positiv beeinflusst (CAPRIEL 2005). Dennoch kann in bestimmten Fällen ein höherer Humusgehalt das Pflanzenwachstum einschränken, indem die eigentlich positive Eigenschaft der organischen Substanz, Nährstoffe zu puffern, zu einer übergangsweise geringeren Verfügbarkeit führt. Insbesondere Stickstoff, der in den meisten Böden zu 95% in organischer Form gebunden ist, kann durch den Einbau in die mikrobielle Biomasse kurzfristig dem Pflanzenzugriff entzogen werden (WRIGHT & HONS 2005).

In zahlreichen Versuchen wurde gezeigt, dass Stickstoff einen vergleichsweise großen Einfluss auf das Wachstum und die Ertragsbildung der Zuckerrübe hat (ALLISON et al. 1996, DRAYCOTT & CHRISTENSON 2003, MALNOU et al. 2003). Zum Erreichen maximaler Zuckererträge ist eine schnelle Ausbildung des Blattapparates von großer Bedeutung

(RÖVER 1995). Dazu benötigt die Zuckerrübe Stickstoff, der den Pflanzen insbesondere in der Jugendentwicklung ausreichend zur Verfügung stehen sollte (ERBAS & FISCHBECK 1972). Bei konservierender Bodenbearbeitung können diesbezüglich Probleme auftreten: Im vorliegenden Versuch weist das  $C_{org}/N_t$ -Verhältnis in allen Umwelten mit vergleichsweise niedrigen Werten eine hohe Qualität und somit Abbaubarkeit des Humus aus (AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN 2005). Allerdings ist mit abnehmender Bearbeitungsintensität ein Anstieg des  $C_{org}/N_t$ -Verhältnisses in der Oberkrume zu beobachten, was u. A. einen langsameren Abbau des Humus zur Folge haben kann. Zusätzlich könnte die von zahlreichen Autoren beobachtete langsamere Erwärmung des Bodens mit Mulchauflage gegenüber einer gepflügten Bodenoberfläche (EHLERS 1992) die Stickstofffreisetzung aus der organischen Bodensubstanz im Frühjahr gehemmt haben. Daraus kann sich eine leicht verzögerte Jugendentwicklung in den reduziert bearbeiteten Verfahren (insbesondere Direktsaat) ergeben haben (BAEUMER & KÖPKE 1989, PEKRUN et al. 2003). Diese Hypothese wird durch Beobachtungen aus dem Feld unterstützt. Allerdings berichteten die Leiter der Versuchsbetriebe oft, dass die pfluglos bestellten Zuckerrüben gegenüber den konventionell angebauten Rüben in den trockenen Sommermonaten erst zu einem späteren Zeitpunkt Welkeerscheinungen zeigten und somit zuvor entstandene Ertragsunterschiede ausgleichen konnten. Ähnliche Beobachtungen machten auch CHERVET et al. (2006). Andere Autoren hingegen fanden bei praxisüblicher Düngung, wie sie im vorliegenden Versuch angewendet wird, keinen Einfluss unterschiedlicher Mineralisationsleistung auf die Jugendentwicklung von Zuckerrüben (HOFFMANN et al. 1997, KÖNIG et al. 2005, TOMANOVÁ et al. 2006).

Voraussetzung für eine exakte Beurteilung, ob bodenbearbeitungsbedingte Unterschiede in der N-Versorgung den Wachstumsverlauf der Zuckerrüben im vorliegenden Versuch beeinflusst haben, ist die Analyse des Nährstoffgehaltes von Pflanzenmaterial während der



Vegetationsperiode (TOMANOVÁ et al. 2006). Diese wurde im Rahmen des vorliegenden Versuchs jedoch nicht erfasst.

#### **4.2 pH-Wert, Phosphor, Kalium und Magnesium**

Der pH-Wert lag ausnahmslos in den Gehaltsklassen C und D und somit im optimalen Bereich für das Pflanzenwachstum. Die Unterschiede zwischen den Bearbeitungsvarianten waren sehr gering. Daher kann ein wesentlicher Einfluss des pH-Wertes auf die Verfügbarkeit von Nährstoffen und somit auf das Pflanzenwachstum ausgeschlossen werden.

Bei der Betrachtung der einzelnen Versuchsstandorte war die Gehaltsklasse aller untersuchten Nährstoffe innerhalb eines Standortes oft sehr ähnlich, wobei die Versorgung mit  $P_{CAL}$  und  $Mg_{CaCl_2}$  weitgehend in der Gehaltsklasse C und die mit  $K_{CAL}$  überwiegend etwas niedriger in der Gehaltsklasse B lag.

Aber nicht nur zwischen den Umwelten, sondern auch innerhalb einer Umwelt variierten die Gehalte an pflanzenverfügbaren Nährstoffen zwischen den Bodenbearbeitungsvarianten sowohl im bearbeiteten als auch im unbearbeiteten Bereich der Krume teilweise beträchtlich. Ein Grund für diese großen Unterschiede könnte in einer unterschiedlichen Vorgeschichte der Varianten liegen, die im Nachhinein nicht mehr nachvollziehbar ist. Möglicherweise gehörten die vergleichsweise großen Versuchsschläge früher zu unterschiedlichen Betrieben, die über eine unterschiedliche Zufuhr von Wirtschafts- oder Mineraldüngern unterschiedliche Bodenvorräte geschaffen haben.

Die Bodenbearbeitung hatte keinen Einfluss auf die Magnesiumgehalte sowie die Magnesiumverteilung im Boden. Demgegenüber zeigten nahezu alle pfluglos bearbeiteten Varianten eine starke Anreicherung von Phosphor und Kalium in der Oberkrume. Diese Beobachtung wurde auch von zahlreichen anderen Autoren gemacht (KAHNT 1971, EHLERS et al. 1972, DREW & SAKER 1978 und 1980, KNITTEL et al. 1985, SARRANTONIO & SCOTT

1988, DÍAZ-ZORITA & GROVE 2002, PEKRUN et al. 2003, VAMERALI et al. 2003). Beim Kalium war die Anreicherung deutlich stärker ausgeprägt als beim Phosphor. Analog war in der Krume auch die Stratifikation (abnehmende Gehalte mit zunehmender Tiefe) beim Kalium größer als beim Phosphor und führte bei Erstem an einigen Standorten in den unteren Bodenschichten zu einer Abreicherung. Diese war in der Unterkrume des Verfahrens Mulch im Mittel der Umwelten signifikant. Ähnliche Beobachtungen machten auch HÜTSCH & STEFFENS (1992), RICHTER (1995) und ZIHLMANN (2001).

Im Gegensatz zur Stratifikation der Nährstoffgehalte bei reduzierter Bodenbearbeitung ist die weitgehend homogene Verteilung von  $P_{CAL}$  und  $K_{CAL}$  in der Krume bei Pflugbearbeitung typisch. Insgesamt waren die  $P_{CAL}$ -Gehalte bei reduzierter Bodenbearbeitung höher als im Verfahren Pflug. Dies kann teilweise durch eine ertragsbedingt unterschiedliche Nährstoffabfuhr, aber auch durch einen verminderten Nährstoffabtrag durch Wassererosion auf reduziert bearbeiteten Ackerflächen begründet sein (BISCHOFF 2006).

Die starke Stratifikation von Phosphor und insbesondere Kalium in der Krume der pfluglos bewirtschafteten Flächen führt zu der Frage, ob Phosphor und Kalium für die Zuckerrübe in allen Varianten gleich verfügbar war. Geringe Wassergehalte können die Diffusionsraten des Nährstoffes zu den Wurzeln senken und somit die Verfügbarkeit negativ beeinflussen (ENGELS et al. 1994). Bei einem Austrocknen der obersten Bodenschicht kann dies dazu führen, dass von den Pflanzen die Nährstoffe trotz hinreichender Gehalte nicht genutzt werden können. Da beim Phosphor bis auf die Umwelt Friemar 2003 auch in Mittel- und Unterkrume noch die optimale Versorgungsstufe C vorlag, ist eine verminderte Verfügbarkeit bei reduzierter Bodenbearbeitung nicht anzunehmen. Somit kann lediglich bei sehr trockenen Witterungsverhältnissen im Hochsommer eine zeitweise eingeschränkte Verfügbarkeit für Kalium vorgelegen haben. Symptome von Kaliummangel wurden jedoch niemals an den Pflanzen beobachtet.

Bei allen untersuchten Nährstoffen konnte keine kausale Beziehung zum Ertrag gefunden werden. Die Regression zwischen Nährstoffgehalt im Boden und Rübenertrag ergab in allen Fällen eine negative Korrelation (nicht dargestellt). Da in der vorliegenden Versuchsserie die untersuchten Nährstoffe aber in mittleren Konzentrationen vorlagen, ergibt sich gemäß Einteilung in die VDLUFA-Gehaltsklassen eine geringe bis optimale Versorgung der Kulturpflanzen. Toxische Nährstoffkonzentrationen, die eine Wachstumseinschränkung für die Zuckerrübe begründen könnten, scheiden somit als Ursache für einen Ertragsrückgang mit steigender Nährstoffkonzentration aus. Eine höhere Nährstoffversorgung, wie sie bei konservierender Bodenbearbeitung gemessen wurde, müsste somit eher zu einer Ertragssteigerung oder zumindest zu Ertragsgleichheit geführt haben. TOMANOVA et al. (2006) berichten in diesem Zusammenhang bei hoher N-Versorgung der Zuckerrübe von einer Förderung des Jugendwachstums durch eine Anreicherung von Grundnährstoffen in der Oberkrume bei konservierender Bodenbearbeitung. Da es keinen sachlogischen Zusammenhang für einen sinkenden Ertrag bei steigenden Nährstoffgehalten im vorliegenden Versuch gibt, scheint der Einfluss der Nährstoffversorgung von anderen Effekten überlagert worden sein. In diesem Zusammenhang sind bearbeitungsbedingte Unterschiede in der Bodenstruktur (DIECKMANN et al 2006) eine mögliche Erklärung für die vorgefundenen Ertragsunterschiede. Die zu Grund liegenden Wirkmechanismen sind dabei noch unklar.

### **4.3 Schlussfolgerungen**

Unterlassene (Direktsaat) sowie flach mischende (Mulch) Bodenbearbeitung verursachte im Vergleich zu wendender Bodenbearbeitung deutliche Mindererträge. Die Gehalte an pflanzenverfügbaren Nährstoffen im Boden waren bei reduzierter Bodenbearbeitung jedoch in den meisten Umwelten höher als bei Pflugbearbeitung. Es wurde eine Anreicherung von

Grundnährstoffen (P, K, Mg) in der Oberkrume gemessen, im Gegenzug aber keine signifikant geringeren Gehalte in tieferen Bodenschichten. Eine geringere Nährstoffverfügbarkeit für P, K und Mg bei reduzierter Bodenbearbeitung als Ursache für Wachstumsunterschiede scheint daher unwahrscheinlich zu sein. Die erheblichen Ertragsunterschiede zwischen den Bodenbearbeitungsvarianten können somit nicht auf Veränderungen der bodenchemischen Eigenschaften zurückgeführt werden. Eine präzisere Aussage ließe sich nur aus der Untersuchung von Nährstoffgehalten der Zuckerrübe während der Vegetationsperiode ableiten. Daher erscheint der Erklärungsansatz von DIECKMANN et al. (2006), in dem Unterschiede in der Bodenstruktur als wesentliche Ursachen für Wachstumsunterschiede ausgemacht wurden, eher geeignet zu sein.

### **Danksagung**

Besonderer Dank gilt dem Kuratorium für Versuchswesen und Beratung im Zuckerrübenanbau, Ochsenfurt, für die finanzielle Förderung dieser Versuchsserie, sowie dem Geschäftsbereich Landwirtschaft der Südzucker AG und insbesondere Herrn Dir. Miller für die Unterstützung bei der Durchführung der Versuche. Den Betriebsleitern sei für die Durchführung aller Anbaumaßnahmen sowie Ines Wiese, Wilfried Hübener und Manfred Jordan für die umfassende Unterstützung bei der Probenahme der Nährstoffproben sowie der Durchführung der Handernt gedankt.

## 5 Literatur

- AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN, 2005: Bodenkundliche Kartieranleitung, (Hrsg.): Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten der Bundesrepublik Deutschland. Hannover, 5. Auflage.
- ALLISON M. F., M. J. ARMSTRONG, K. W. JAGGARD, A. D. TODD & G. F. J. MILFORD, 1996: An analysis of the agronomic, economic and environmental effects of applying N fertilizer to sugarbeet (*Beta vulgaris*). *J. Agr. Sci.* **127**, 475-486.
- ANONYMUS, 2002: Tabellen und Vorgaben für die Einstufung der Grundnährstoffgehalte von Böden, LUFA Augustenberg & LFL Chemie Hohenheim. [http://www.landwirtschaft-bw.info/servlet/PB/show/1073867\\_11/lufa\\_EinstufungderGrundnährstoffgehaltevonBöden-TabellenundVorgaben.pdf](http://www.landwirtschaft-bw.info/servlet/PB/show/1073867_11/lufa_EinstufungderGrundnährstoffgehaltevonBöden-TabellenundVorgaben.pdf), besucht am 29.12.2006.
- ANONYMUS, 2004: Bestimmung von leicht löslichen (pflanzenverfügbaren) Haupt- und Spurennährstoffen. In: VDLUFA Methodenbuch 1, A 6, 4. Teillieferung
- ANONYMUS, 2006: SAS-Makro Box-cox-transformation, Universität Hohenheim, Institut für Bioinformatik. <http://www.uni-hohenheim.de/bioinformatik/beratung/toolsmacros/-boxcox-macro.sas>, besucht am 12.11.2006.
- AHL, C., R. G. JOERGENSEN, E. KANDELER, B. MEYER & V. WOEHLE, 1998: Microbial biomass and activity in silt and sand loams after long-term shallow tillage in central Germany. *Soil Till. Res.* **49**, 93-104.
- BAEUMER, K. & U. KÖPKE, 1989: Effects of nitrogen fertilization. In: BAEUMER, K. & W. EHLERS (Hrsg.): Energy saving by reduced tillage, 145-162. European Communities, Brüssel und Luxemburg.
- BECKER, K.-W., 2003: Bodenbearbeitung ohne Pflug – Auswirkungen auf die Dichte des Bodens und die Speicherung von Humus. *Mitt. Deut. Bodenk. Ges.* **102**, 617-618.
- BISCHOFF, J., 2006: Kopflastige Krume – Bei Phosphor: bis zu zwei Gehaltsklassen Unterschied zwischen Ober- und Unterkrume. *Neue Landwirtschaft* **6**, 37-39.
- CAPRIEL, P., 2005: Humusversorgung der Böden. <http://www.lfl.bayern.de/inter-net/stmlf/lfl/iab/bodenbearbeitung/13479/index.php>, besucht am 23.10.2006.
- CHERVET, A., C. MAURER, W.-G. STURNY. & M. MÜLLER, 2005: Direktsaat im Praxisversuch: Einfluss auf die Struktur des Bodens. *Agrarforschung* **8**, 12-17.
- CHERVET, A., L. RAMSEIER W.-G. STURNY, P. WEISSKOPF, U. ZIHLMANN, M. MÜLLER & R. SCHAFFLÜTZEL, 2006: Bodenwasser bei Direktsaat und Pflug. *Agrarforschung* **13**, 162-169.
- DENEF, K., J. SIX, R. MERCKX, K. PAUSTIAN, 2004: Carbon sequestration in microaggregates of no-tillage soils with different clay mineralogy. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **68**, 1935-1944.

- DEXTER, A. R., 2004: Soil physical quality Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma* **120**, 201-214.
- DÍAZ-ZORITA, M. & J. H. GROVE, 2002: Duration of tillage management affects carbon and phosphorus stratification in phosphatic Paleudalfs. *Soil Till. Res.* **66**, 165-174.
- DIECKMANN, J., H. MILLER & H.-J. KOCH, 2006: Rübenwachstum und Bodenstruktur – Ergebnisse aus dem Gemeinschaftsprojekt Bodenbearbeitung. *Zuckerind.* **131**, 642-654.
- DIETSCH, A., 2003: Kosten der Zuckerrübenproduktion in bedeutenden Anbaugebieten Deutschlands. *Zuckerrübe* **6**, 296-298.
- DRAYCOTT, A. P. & D. R. CHRISTENSON, 2003: Nutrients for sugar beet production, soil-plant relationships. CAB International, Oxon, Cambridge.
- DREW, M. C. & L. R. SAKER, 1978: Effects of drilling and ploughing on root distribution in spring barley, and on the concentrations of extractable phosphate and potassium in the upper horizons of a clay soil. *J. Sci. Food Agr.* **29**, 201-206.
- DREW, M. C. & L. R. SAKER, 1980: Direct drilling and ploughing: their effects on the distribution of extractable phosphorus and potassium, and of roots, in the upper horizons of two clay soils under winter wheat and spring barley. *J. Agr. Sci.* **94**, 411-423.
- DUFFNER, J., U. JENSEN & E. SCHUMACHER, 2002: Statistik mit SAS. B. G. Teubner GmbH, Stuttgart, 2. Auflage.
- EHLERS, W., G. PAPE & W. BÖHM, 1972: Tiefenverteilung und zeitliche Änderungen der laktatlöslichen Kalium- und Phosphorgehalte während einer Vegetationsperiode in unbearbeiteten und bearbeiteten Böden. *Z. Pflanz. Bodenkunde* **133**, 24-36.
- EHLERS, W., 1992: Reduzierte Bodenbearbeitung – Ökologische Folgen und ackerbauliche Grenzen. *VDLUFA Schriftenr.* **35**, 35-57.
- ENGELS, C., M. MOLLENKOPF UND H. MARSCHNER, 1994: Effect of drying and rewetting the topsoil on root growth of maize and rape in different soil depths. *Z. Pflanz. Bodenkunde* **156**, 139-144.
- EPPERLEIN, J., 2001: Vergleichende Untersuchungen zum Einfluss konservierender Bodenbearbeitung auf ausgewählte biologische und physikalische Bodenparameter im Biosphärenresevat Schorfheide-Chorin. Diss., Berlin.
- ERBAS, S & G. FISCHBECK, 1972: Einfluss der Stickstoffdüngung und anbautechnischen Maßnahmen auf die Blattformentwicklung sowie über die Beziehungen zwischen Blattflächenindex und Wurzelertrag bei Zuckerrüben. *Z. Acker Pflanzenbau* **135**, 122-134.
- FOY, C. D., 1992: Soil chemical factors limiting plant root growth. In: HATFIELD, J. L. & B. A. STEWART (Hrsg.): Limitations to plant root growth. *Adv. Soil Sci.* **19**, New York, Berlin, London, 97-149.

- FRANZLUEBBERS, A. J. & M. A. ARSHAD, 1996: Soil organic matter pools during early adoption of conservation tillage in Northwestern Canada. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **60**, 1422-1427.
- HAIDER, K., 1996: *Biochemie des Bodens*. Enke, Stuttgart.
- HARRACH, T. & T. VORDERBRÜGGE, 1991: Die Wurzelentwicklung von Kulturpflanzen in Beziehung zum Bodentyp und Bodengefüge. *Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit*. Bd. 2: Bodengefüge, Bereich Landwirtschaft, Sonderheft **204**, 69-82.
- HOFFMANN, C., 1997: Wachstumsanalyse von Zuckerrüben bei langjährig differenzierter Bodenbearbeitung. *Pflanzenbauwiss.* **1**, 164-170.
- HOFFMANN, C., 2006: Zuckerrüben als Rohstoff. Die technische Qualität als Voraussetzung für eine effiziente Verarbeitung. *Habilitationsschrift Universität Göttingen*.
- HOFFMANN, C., H. PLATTE, T. LICKFETT & H.-J. KOCH, 1997: Microbial biomass and N mineralization in relation to N supply of sugar beet under reduced tillage. *Z. Pflanz. Bodenkunde* **160**, 187-193.
- HÜTSCH, B. & D. STEFFENS, 1992: Einfluss differenzierter Bodenbearbeitung auf die vertikale Verteilung von verfügbarem Phosphat und Kalium im Profil von vier unterschiedlichen Bodentypen. *Agribiol. Res.* **45**, 352-359.
- KAHNT, G., 1969: Ergebnisse zweijähriger Direktsaatversuche auf drei Bodentypen. *Z. Acker Pflanzenbau* **129**, 277-295.
- KAHNT, G., 1971: NPK- und C-Veränderungen auf 3 Bodentypen nach 5 Jahren pfluglosem Ackerbau. *Landw. Forsch.* **26**, 273-280.
- KNITTEL, H., H. LANG & J. DRESSEL, 1985: Einfluss der Stickstoffdüngung auf Ertrag und N-Mineralisation einer Ackerbraunerde bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung. *Kongressband VDLUFA-Schriftenr.* **16**, 335-343.
- KÖNIG, H.-P., H.-J. KOCH & B. MÄRLÄNDER, 2005: Wirkung von langjährig differenzierter Bodenbearbeitung und N-Düngung auf N-Aufnahme und N-Bilanz einer Zuckerrüben-Wintergetreide-Fruchtfolge. *Pflanzenbauwiss.* **9**, 19-28.
- KREUTER, T., 2006: Zum Einfluss der Bodenbearbeitung auf ausgewählte Elemente des Bodenlebens. [http://www.landwirtschaft.sachsen.de/de/wu/Landwirtschaft/lfl/inhalt/7105\\_7110.htm](http://www.landwirtschaft.sachsen.de/de/wu/Landwirtschaft/lfl/inhalt/7105_7110.htm), besucht am 05.12.2006.
- LIEBHARD, P., 1997: Einfluss der Primärbodenbearbeitung auf Ertrag, Ertragsverhalten und ausgewählte Qualitätskriterien von Zuckerrübe (*Beta vulgaris* L. ssp. *vulgaris* var. *altissima* Doell) im oberösterreichischen Zentralraum (Teil 8). *Bodenkultur* **48**, 3-14.
- LIEBMAN, M., S. CORSON, R. J. ROWE & W. A. HALTEMAN, 1995: Dry bean responses to nitrogen fertilizer in two tillage and residue management systems. *Agron. J.* **87**, 538-546.
- LÜTKE-ENTRUP, N., M. SCHNEIDER & J. BRAUN, 2003: Bearbeitungsgänge sparen, aber mit Augenmaß. Nur mit standortgerechten Bewirtschaftungssystemen sind die

- Kostenvorteile der konservierenden Bodenbearbeitung zu erschließen. Neue Landwirtschaft-Sonderheft, 9-14.
- MÄRLÄNDER, B., C. HOFFMANN, H.-J. KOCH, E. LADEWIG, R. MERKES, J. PETERSEN & N. STOCKFISCH, 2003: Environmental Situation and Yield Performance of Sugar Beet Crop in Germany: Heading for Sustainable development. *J. Agron. Crop Sci.* **189**, 201-226.
- MALNOU, C. S., K. W. JAGGARD & D. L. SPARKES, 2003: A canopy approach to nitrogen recommendations for the sugar beet crop. *Zuckerind.* **128**, 673-678.
- MEIER, U., L. BACHMANN, E. BUHTZ, H. HACK, R. KLOSE, B. MÄRLÄNDER & E. WEBER, 1993: Phänologische Entwicklungsstadien der Beta-Rüben (*Beta vulgaris* L. ssp.). Codierung und Beschreibung nach der erweiterten BBCH-Skala mit Abbildungen. *Nachrichtenbl. Deut. Pflanzenschutzd.* **45**, 37-41.
- MERKES, R., H. COENEN, F. HESSE & G. SCHÜTZ, 2003: Stand der Produktionstechnik zu Zuckerrüben – Ergebnisse der Umfrage 2002. *Zuckerind.* **128**, 425-433.
- PEKRUN, C., H.-P. KAUL & W. CLAUPEIN, 2003: Soil tillage for sustainable nutrient management. In: ADEL EL TITI (Hrsg.): *Soil Tillage in Agroecosystems*, PCR Press LLC, Boca Raton.
- PLANTE, A. F., R. T. CONANT, C. E. STEWART, K. PAUSTIAN & J. SIX, 2006 : Impact of soil texture on the distribution of soil organic matter in physical and chemical fractions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **70**, 287-296.
- RASMUSSEN, K. J., 1999: Impact of ploughless soil tillage on yield and soil quality: A Scandinavian review. *Soil Till. Res.* **53**, 3-14.
- RÖVER, A., 1995: Ertragsbildung bei Zuckerrüben in Abhängigkeit von Blattfläche und intraspezifischer Konkurrenz. Diss. Göttingen
- RICHTER U., 1995: Einfluss langjährig differenzierter Bodenbearbeitungssysteme auf das Bodengefüge und den Stickstoffhaushalt. Diss. Gießen
- SARRANTONIO, M. & T. W. SCOTT, 1988: Tillage effects on availability of nitrogen to corn following a winter green manure crop. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **52**, 1661-1668.
- SCHLICHTING, E., H.-P. BLUME & K. STAHRK, 1995: *Bodenkundliches Praktikum*. Blackwell, Berlin, 2. Auflage.
- SCHLÜTER, K., 2003: Mulchsaat-Praxis MSP - Monoweizen plus Mulchsaat. DLG-Mitteilungen, 11/2003.
- SCHMIDT, W., O. NITZSCHE, S. KRÜCK & W. RICHTER, 2002: Schutz von Zuckerrübenflächen vor Wassererosion und Nährstoffabtrag durch konservierende Bodenbearbeitung. *Proc* **65**, IIRB-Kongreß, 47-58.
- SHARPLEY, A. N., J. J. MEISINGER, J. F. POWER & D. L. SUAREZ, 1992: Root extraction of nutrients associated with long-term soil management. In: HATFIELD, J. L. & B. A. STEWART (Hrsg.): *Limitations to plant root growth*. *Adv. Soil Sci.* **19**, New York, Berlin, London, 97-149.



- SILGRAM, M. & M. A. SHEPHERD, 1999: The effects of cultivation on soil nitrogen mineralization. *Adv. Agron.* **65**, 267-311.
- STOCKFISCH, N., T. FORSTREUTER & W. EHLERS, 1999: Ploughing effects on soil organic matter after twenty years of conservation tillage in Lower Saxony, Germany. *Soil Till. Res.* **52**, 91-101.
- THOMAS, G.A., R.C. DALAL & J. STANDLEY, 2006: No-till effects on organic matter, pH, cation exchange capacity and nutrient distribution in an Luvisol in the semi-arid subtropics. *Soil Till. Res.* (**2006**), doi:10.1016/j.still.2006.08.005.
- TOMANOVÁ, O., N. STOCKFISCH & H.-J. KOCH, 2006: Einfluss langjährig differenzierter Bodenbearbeitung auf Wachstum und Nährstoffversorgung von Zuckerrüben während der Vegetationsperiode. *Pflanzenbauwiss.* **10**, 16-25.
- VAMERALI, T., A. GANIS, S. BONA & G. MOSCA, 2003: Fibrous root turnover and growth in sugar beet (*Beta vulgaris* var. *saccharifera*) as affected by nitrogen shortage. *Plant Soil* **255**, 169-177.
- WALDORF, N. V. & R. SCHULZE, 2003: Auswirkungen verschiedener Bodenbearbeitungsverfahren auf pflanzenbauliche Parameter. *Landinfo* **9**, 6-10.
- WILLIAMS, A., B. S. XING & P. VENEMAN, 2005: Effect of cultivation on soil organic matter and aggregate stability. *Pedosphere* **15**, 255-262.
- WRIGHT, A. L. & F. M. HONS, 2005: Tillage impacts on soil aggregation and carbon and nitrogen sequestration under wheat cropping sequences. *Soil Till. Res.* **84**, 67-75.
- ZIHLMANN, U., P. WEISSKOPF, M. MÜLLER, R. SCHAFFLÜTZEL, A. CHERVET & W. G. STURNY, 2001: Direktsaat im Praxisversuch: Einfluss auf die Nährstoff- und Humusgehalte im Boden. *Agrarforschung* **8**, 18-22.

## **Yield decrease of sugar beet caused by reduced tillage and direct drilling is related to plant population and soil structure**

**Jan Dieckmann, Heinz-Josef Koch, Andreas BÜchse und Bernward Märländer**

### **Abstract**

In the 1990s, large-scale on-farm field trials were established on 10 loessial sites in southern and eastern Germany to evaluate the effect of tillage systems (annual mouldboard ploughing 0.25-0.3 m deep, mulching with a rigid-tine cultivator 0.1-0.15 m deep, direct drilling with no tillage except seedbed preparation for sugar beet solely) on crop yield and economic performance. Under such conditions, long-term average sugar beet yield was significantly decreased by direct drilling compared to ploughing.

This study was conducted to (i) prove that the lower plant density caused by mulching and direct drilling contributes to yield decrease but explains effects just partially, and (ii) determine the relation between soil structural properties and sugar beet yield. In 2003-2005 plant density experiments (53.000, 65.000 and 82.000 plants ha<sup>-1</sup>) were introduced to tillage plots on five selected environments. Yield was measured, and simultaneously, soil structural properties were determined in four layers representing 0-0.43 m soil depth.

White sugar yield (WSY) significantly declined with direct drilling compared to ploughing treatment, whereas mulching treatment diminished WSY less pronounced. Moreover, decreasing plant density significantly lowered WSY. No interactions between tillage and plant density occurred, revealing that both factors additively affected WSY.

Decreasing tillage depth increased penetration resistance (PR) and dry bulk density (DBD), and diminished air filled pore volume (AFPV) in the topsoil down to 0.27 m depth, respectively. Several soil structural parameters were closely correlated with each other, and so was WSY. Variation of single parameters explained up to 60 % of WSY variance

attributed to tillage. Combining DBD from 0.03-0.07 m depth, average PR from 0.03-0.27 m and AFPV from 0.03-0.18 m soil depth explained 77 % of the tillage effect. Nevertheless, multi-collinearity of soil physical parameters allowed no clear conclusions on the principles of cause and effect.

Conclusively, this investigation shows that both, lowered plant density and soil structure degradation due to reduced tillage, may reduce sugar beet yield independently. Thus, sugar beet grown on loessial soils require mechanical loosening down to 0.15-0.20 m depth to produce high yields.

### **Key words**

Sugar beet, conservation tillage, direct drilling, plant density, soil structure, penetration resistance, dry bulk density, air filled pore volume, plant available water content

## **1 Introduction**

The on-going structural changes within the mid-European agriculture industry, showing a clear tendency to bigger work units, have had an impact on the intensity of tillage: effective tillage systems are vital in order to carry out the work on time and cost efficiently. This has lead to a change over from cost and work intensive deep mouldboard ploughing to simplified non-inversion tillage systems. As prices of fuels and lubricants are increasing the saving potential through reduced soil tillage is expected to gain even more importance in the future (Nail et al., 2007). Ecological aspects like the reduction of erosion risk (Schmidt et al., 2002), the increase in biodiversity (Kreuter, 2006) as well as the maintenance and improvement of soil fertility (Capriel, 2005) are also encouraging reasons to apply reduced tillage systems. Moreover, conservation tillage practices keeping the soil surface covered by crop residues to at least 30 % (CTIC, 1996, cited at Lindstrom and Archer, 2003) offer the potential to sequester carbon (Freibauer et al., 2004).

A high yield is a vital prerequisite for the economical feasibility of conservation tillage and its acceptance by farmers. In this respect the production factor soil plays an essential role. A sound soil with an intact soil structure is the base for sustainable development of plant production that facilitates high yield and quality both today and in the future (Gisi et al., 1997). For the production of winter cereals conservation tillage systems are optimized and well established (Epperlein, 2001), whereas in sugar beet shallow non-inversion cultivation is frequently reported to have a negative yield impact (Baeumer and Pape, 1972; Hoffmann, 1997; Ahl et al., 1998; Tomanová et al., 2006). Especially the continuous and complete abandonment of soil cultivation (direct drilling) often results in a significant reduction of root yield in comparison with regular 0.25-0.30 m deep mouldboard ploughing (Waldorf and Schulze, 2003). A common and obvious reason for the sugar beet yield loss going along with shallow-mixing tillage and direct drilling is a low plant density (Richard et al., 1995). Inadequate embedding of the seeds caused by a high amount of harvest residues lying on the soil surface, and moreover, a high strength of the surface soil was reported as the principal cause for the observed failure of plant establishment (Pringas and Märländer, 2004). In order to achieve a maximum white sugar yield (WSY) a plant density of approximately 80.000 plants ha<sup>-1</sup> or more is required (Märländer, 1990), because at lower plant densities increased growth of established plants cannot fully compensate for neighbouring gaps (Märländer and Röver, 1994).

These findings widely agree with results from a long-term on-farm tillage experiment which started in the early 1990ies at 10 sites in southern and eastern Germany (Pringas and Märländer, 2004): In this experiment plant density was substantially decreased and sugar yield about 15 % lower with direct drilling compared to mouldboard ploughing. But, a detailed analysis of data from this experiment revealed a substantial yield decrease in the direct drilling treatment even if the plant density was sufficiently high or optimal. Thus, other

effects than plant density must be taken into account as supplemental causes for the yield decrease observed with direct drilling.

Tillage systems differing in depth and intensity are well known to alter chemical and physical soil properties affecting plant growth (Pekrun et al., 2003). In our experiment, alteration of soil chemical parameters through direct drilling was determined by Dieckmann and Koch (2008) but, results gave no indication that nutrient supply limited sugar beet yield. Therefore, the aim of the present study was to analyze whether changes in soil physical properties at least partially accounted for yield differences between tillage systems.

Several authors previously investigated the effect of soil structure on sugar beet growth. Draycott et al. (1970), Czeratzki (1972) and Jaggard (1977) compared a variety of spring tillage and wheeling operations conducted after mouldboard ploughing in autumn. They observed that an increase of penetration resistance (PR) and dry bulk density (DBD) in the topsoil (0-0.30 m) was closely related to decreasing yield. For loamy soils upper limits were reported as 2.0 MPa for PR and 1.50 Mg m<sup>-3</sup> for DBD (Liebhard et al., 1995; Jaggard, 1977). At higher values fibrous root growth was supposed to be limited, resulting in restricted water and nutrient uptake. Maidl et al. (1982) compared the effect of soil water content at autumn ploughing on soil structure and sugar beet growth. They concluded that the reduction of soil porosity decreased the rate of soil organic N mineralization in spring which limited sugar beet growth. In contrast, for conservation tillage/direct drilling conditions detailed investigations on the relation between soil structural changes and sugar beet growth responses are not available (Liebhard, 1997). Therefore, the aims of our study were to

- (1) prove that differences in plant density, which occur under various long-term soil cultivation systems, contribute to the yield variation observed but explain effects just partially,

- (2) determine the relation between soil structural properties as affected by tillage and sugar beet yield

For these purposes a detailed analysis of soil structural properties was conducted on selected sites of a long-term on-farm soil tillage experiment. Simultaneously, in each tillage treatment sugar beet plant density was varied systematically in order to examine the influence on yield exerted by tillage, plant density, and their interaction. Analysis of covariance was applied to estimate how much of the variance caused by tillage was explained by the variation of soil structural parameters.

## 2 Material and Methods

### 2.1 Experimental sites and treatments

Five environments were selected from a set of soil tillage trials, which have been established in the early 1990ies on commercial fields in typical arable regions of southern and eastern Germany. Details about the sites are given in Table 1. The sites considerably differed in long-term (1961-1990) mean air temperature and precipitation. The temperature difference from the coldest to warmest site was 2.6 °C. The annual precipitation ranged between 512 and 709 mm. Differences in humus content and texture of soil caused differences in friability between sites: Friemar, Lüttewitz and Zschortau soils were easily tillable, while soils at Insultheim and Sailtheim were more difficult to cultivate.

Tab. 1: Long-term average weather conditions and topsoil texture (0.03-0.27 m) at the experimental sites, texture data result from representative pits.

Site	Year	Federal state	Altitude [m]	Air temp. Ann. average [°C]	Precipitation 1961-1990 [l m <sup>-2</sup> ]	Humus [mg g <sup>-1</sup> ]	Texture		
							Clay	Silt	Sand
							[mg g <sup>-1</sup> ]		
Friemar	2003	Thuringia	310	7.8	517	27.6	290	680	30
Insultheim	2004	Baden-Wuerttemberg	95	10.4	588	36.6	300	520	180
Sailtheim	2004	Baden-Wuerttemberg	360	8.6	709	18.3	190	780	30
Lüttewitz	2005	Saxony	290	8.6	572	20.6	140	830	30
Zschortau	2005	Saxony	110	8.8	512	20.5	140	530	330

At each site one large homogeneous field was divided into three equally sized tillage treatment plots. The treatments consisted of (i) annual mouldboard ploughing 0.30 m deep (ploughing), (ii) mixing tillage with a cultivator and/or disc harrow 0.10-0.15 m deep (mulching), and (iii) no-tillage (direct drilling). However, in direct drilling plant establishment of sugar beet repeatedly failed on large field spots because many seeds remained uncovered with soil. This resulted in inadequate water supply for germination, damages from mice and slugs, etc. Consequently, 0.03-0.05 m deep seed bed cultivation only before sowing of sugar beet was introduced in the direct drilling treatment to improve sugar beet crop establishment.

Depending on site, tillage plot size ranged from 2.5 to 8 ha. The tillage systems were applied as permanent treatments to all crops of the sugar beet – winter wheat – winter wheat rotation. At each site, tillage treatments were conducted without replicates.

On each large-scale tillage plot a plant density experiment was conducted as a small-plot trial in a completely randomized design with four replicates. Plant densities were adjusted to 53.000, 65.000, and 82.000 plants ha<sup>-1</sup> by manual singling of denser stands at 6-8-leaf-stage of plants in May. Within rows, 1st and 2nd order gaps (one and two plants missing in sequence, respectively) were added. The number of gaps increased with decreasing plant density. Gaps were evenly distributed across the rows of a plot. Plots consisted of 6 rows (row width 0.45 m, total width 2.7 m) with a length of 8 m. At Friemar 2003 only the highest plant density and at Insultheim 2004 only the highest and the lowest density were tested due to technical reasons.

## **2.2 Crop management**

The fields were operated by the agricultural division of Südzucker AG with farm-specific machinery. For seedbed preparation and stubble tillage a cultivator and/or a disc harrow was applied. After wheat harvest, mustard was grown as a catch crop. Crop residues were

left in the field. Sugar beet was sown in March-April by using a single-seed drill adapted to crop residues lying on the soil surface. Due to the low field emergence to be expected with direct drilling, the seed rate was increased in this treatment by reducing the seed distance within rows to 0.17 m compared to 0.19 m in the other treatments.

Crop management was carried out according to the regional standards of recommended agricultural practices. At each site and year management was conducted uniformly in all tillage treatments except the use of non-selective herbicides which were applied as necessary in treatments mulching and direct drilling solely. Furthermore, sugar beet selective herbicides, molluscicides and rodenticides were applied differently if infestation level substantially differed between treatments.

Mineral fertilizers (N, P, K, Mg) were given according to the EUF recommendations at equal rates across all treatments at one site. The N fertilizer level for sugar beet ranged from 50-120 kg N ha<sup>-1</sup>.

### **2.3 Soil physical investigations**

Initially, in each large-scale tillage plot a sampling area of 40 m x 40 m was identified revealing widely homogenous conditions with regard to soil type and texture, especially in the depth of 0-0.45 m. Subsequently, the sampling area was quartered, and soil PR measured in each quarter to a depth of 0.6 m with a penetrometer (Eijkelkamp, Giesbeek, NL; cross-sectional area 1 cm<sup>2</sup>, angle 60°). Measurements were conducted after sowing of sugar beet when soil moisture was close to field capacity. 10 replicates per quadrant were taken on a diagonal. Mean PR values were calculated for the depths 0.03-0.07, 0.13-0.18, 0.23-0.27 and 0.38-0.45 m.

Moreover, undisturbed soil core samples were taken vertically at 0.03-0.07 m and 0.23-0.27 m (100 cm<sup>3</sup>, 50 mm in diameter), and 0.13-0.18 and 0.38-0.43 m (250 cm<sup>3</sup>, 80 mm in diameter) depth from a soil pit (sized approx. 2 m<sup>2</sup>) located in the center of each



40 m x 40 m square. Three sampling positions were established on three of the four sides of each pit. From each sampling position and depth 8-10 cores were taken. Additionally, disturbed soil was taken as a composite sample from each depth of a pit. In each tillage treatment, the plots of the plant population experiment were located close to the pit.

Soil samples were stored cool and dark until analysis. Soil texture was determined by wet sieving of the sand fraction, and the pipette method according to Köhn (Schlichting et al., 1995) for the silt and clay fraction. For the pipette analysis the "SEDIMAT 4-12" (Umwelt-Geräte-Technik GmbH, Müncheberg, Germany) was used. The soil particle density was measured using an Accupyc 1330 gas pycnometer (Micromeritics Instr. Corp., Norcross, GA) according to Blake and Hartge (1986).

Soil cores were wetted to saturation on a sand bed, drained at 6.2 kPa water tension and weighed. After oven-drying to constant weight the cores were weighed again. Water content at 1500 kPa water tension (wilting point) was determined from soil crumbs on ceramic plates.

DBD was calculated from core dry weight divided by volume. Total pore volume was determined from DBD and particle density. Volumetric water content after drainage was set as water filled pore volume at 6.2 kPa. The air filled pore volume (AFPV) was computed from total pore volume minus water filled pore volume at 6.2 kPa water tension. The difference between the volumetric water content at 6.2 kPa and 1500 kPa was set as plant available water capacity (PAWC).

## **2.4 Sugar beet yield and quality assessment**

At the end of September, sugar beet plants from three center rows of each plot (10.8 m<sup>2</sup>) were topped and harvested manually. Beets were washed and weighed, and processed to brei, which was shock-frozen and stored at -18 °C until analysis. Technical quality parameters (saccharose, potassium, sodium, α-amino-nitrogen) were analyzed as

described by Hoffmann (2006). The calculation of the sugar loss to molasses and the white sugar yield (WSY) followed formulas given by Märländer et al. (2003).

## 2.5 Statistical Evaluation

For statistical evaluation, each combination of site and year was taken as an environment. Due to mechanization reasons it was not practicable to repeat tillage plots within environments. Therefore, statistical tests of tillage effects within single environments are not reasonable. Hence, mean values of the combined analysis across all environments were compared only.

Analysis of variance for WSY was performed in two steps. At first, an ordinary ANOVA-model with fixed effects for environment, plant density and tillage, and its interactions was applied. Plant density was included as a quantitative variable. The effects were tested against the residual error. In a second step, the yield was analyzed with a linear mixed model assuming random environment effects. This allows a more general interpretation of results obtained by the experiments. The model was analogous to a split-plot-design with environments as full replicates, tillage within single environments as main plots and measurement of yield on subplots. The plant density counted on subplots was included as a fixed quantitative covariate. The plant density and tillage main effects as well as the interaction tillage  $\times$  density were taken as fix effects while environment effects and interactions environment  $\times$  tillage, environment  $\times$  plant density and environment  $\times$  tillage  $\times$  density were modeled as random effects. A covariance between intercept and slope of the random regression terms environment  $\times$  density and environment  $\times$  tillage  $\times$  density was enabled by using an unstructured variance-covariance matrix (random coefficient model; Longford, 1993). Multiple mean comparisons based on this random coefficient model.

For analysis of PR, arithmetic means were calculated for each quadrant, and moreover, each of the four horizons sampled with cores (0.03-0.07 m, 0.13-0.18 m, 0.23-0.27 m, 0.38-

0.45 m). Hence, 48 mean values per environment (3 tillage plots  $\times$  4 quadrants per tillage plot  $\times$  4 depths) were obtained. For analysis of DBD, AFPV and PAWC, arithmetic means were calculated from the internal replicates that were taken in the same depth at the same side of the pit. Thus we obtained 36 mean values per environment (3 tillage plots  $\times$  3 sides per pit  $\times$  4 depths). These mean values were then analyzed with the following linear mixed model for repeated measurements, again assuming random environment effects:

$$y = \mu + \textit{tillage} + \textit{depth} + (\textit{tillage} \times \textit{depth}) + \textit{environment} + (\textit{environment} \times \textit{depth}) + (\textit{environment} \times \textit{tillage}) + (\textit{environment} \times \textit{tillage} \times \textit{depth}) + \textit{error}.$$

Covariance between depths within a plot was modeled with an autoregressive correlation structure. Covariance between sides and depths within a pit was modeled with an anisotropic power structure. Selection of covariance structures was done by comparison of AIC-values (Wolfinger, 1996).

For further clarification of potential reasons for soil tillage effects on yield, the mean values of soil physical parameters for each combination of *environment*  $\times$  *tillage*  $\times$  *depth* were calculated. For WSY, least square means for each combination of *environment*  $\times$  *tillage* (adjusted for plant density differences) were determined by using the random coefficient model. WSY least square means obtained were centered by environment means. Yield data residuals obtained were influenced by tillage effects but independent from environment and plant density effects. Spearman's rank correlation was applied to determine the relation between yield and soil parameters. Regression analysis and graphic presentation was conducted with SigmaPlot 10, Systat Software Inc., San Jose Calif., USA.

Soil parameters with high correlation to WSY were then integrated into the fixed ANOVA model used for the analysis of yield effects. In the model, type I sum of squares were applied to fit quantitative covariates before adding the qualitative variable "soil tillage".

All statistical analysis was done using PROC GLM, PROC CORR and PROC MIXED of the SAS System (Littell et al., 1996, Version 9.1.3, SAS Inc., Cary N.C., USA). With PROC

MIXED, the REML-algorithm was used to estimate variances and effects. Significance of fixed effects and differences between mean values of fixed effects were tested by F-test and multiple t-test at  $\alpha = 0.05$ . Approximation of degrees of freedom in the mixed model was performed with the method of Kenward and Roger (1997).

### 3 Results

The variation of WSY data was predominantly attributed to the environment, and far less to the experimental factors plant density and tillage, both revealing significant at  $\alpha = 0.001$  level (Tab. 2, fixed effects model). Interactions were significant except plant density x environment x tillage. When setting the effect of the environment at random and testing the other sources of variance according to the random coefficient model, the main effects of plant density and tillage remained significant while their interaction became insignificant.

Tab. 2: Analysis of variance for white sugar yield [ $\text{Mg ha}^{-1}$ ] and F-tests based on a fixed effects model (ANOVA) and a random coefficient model (RCM).

Source	DF	Sum of Squares	Mean Squares	F-Value (ANOVA)	F-Value (RCM)
Plant density (PD)	1	20.7	20.7	65.1 ***	22.7 **
Environment (E)	4	463.2	115.8	363.4 ***	random
Soil tillage (ST)	2	36.1	18	56.6 ***	24.4 ***
E x ST	8	6.5	0.8	2.5 *	random
PD x ST	2	2.1	1	3.3 *	0.8 <sup>ns</sup>
PD x E	4	3.1	0.8	2.5 *	random
PD x E x ST	8	4.1	0.5	1.6 <sup>ns</sup>	random
Error	113	36	0.3		

F-value significant at  $\alpha = 0.05$  (\*), 0.01 (\*\*), 0.001 (\*\*\*);  
ns = not significant

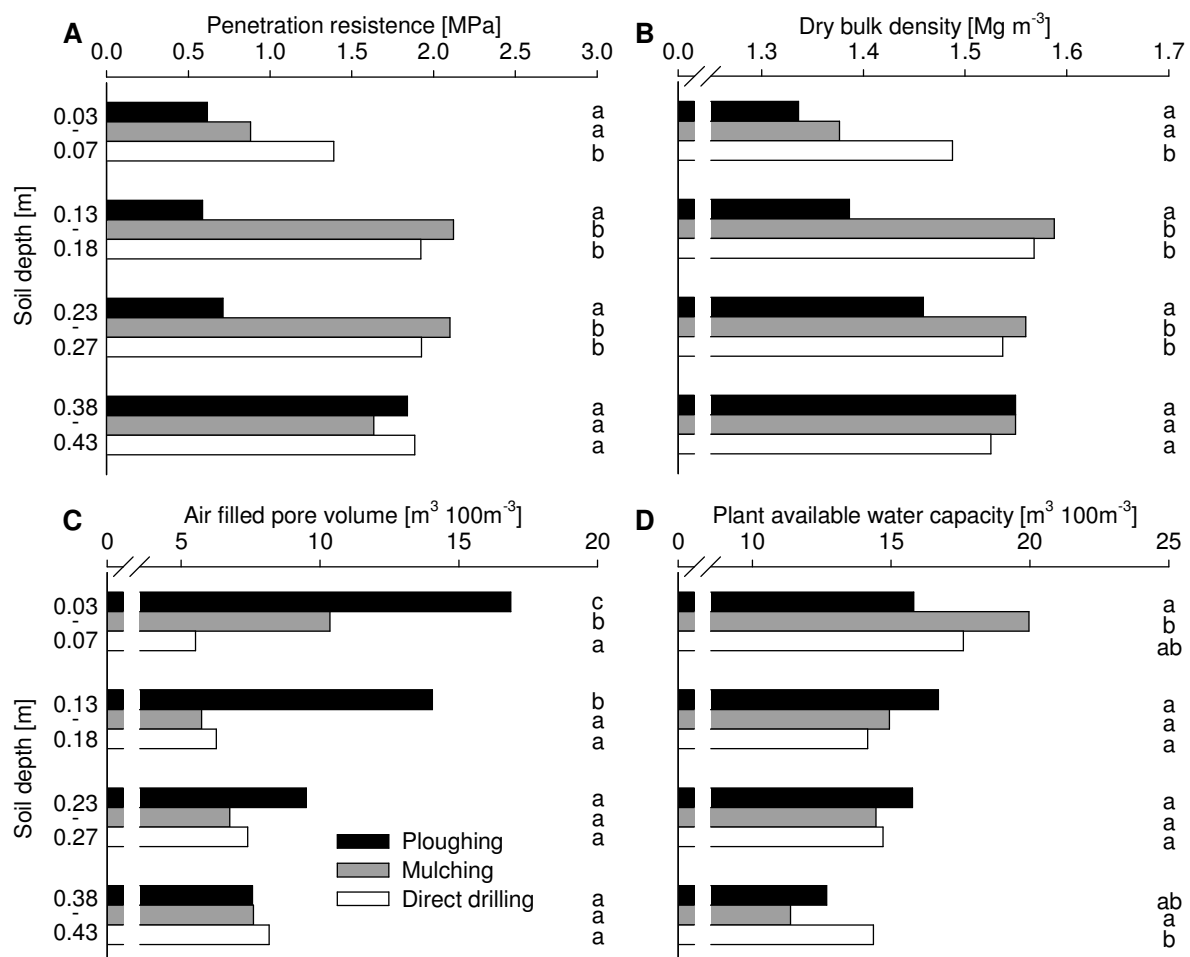
Across tillage treatments, WSY significantly declined with decreasing plant density (Tab. 3). Yield decreased only slightly from treatment ploughing to treatment mulching, but further reduction of tillage intensity (direct drilling) significantly diminished WSY on average across plant density. No significant interactions occurred.

Tab. 3: Influence of soil tillage and plant density on white sugar yield [ $\text{Mg ha}^{-1}$ ], means of five environments. Means with the same letter within rows and columns, respectively, are not significantly different (LSD,  $\alpha = 0.05$ ). Upper case letters refer to comparisons between plant density treatments (within columns), lower case letters to those between tillage treatments (within rows). s.e.d. = standard error of difference.

[Plants $\text{ha}^{-1}$ ]	Ploughing	Mulching	Direct Drilling	s.e.d within rows	Mean across tillage treatments
53000	9.82 C a	9.53 C a	8.46 C b	0.30	9.27 C
65000	10.21 B a	9.81 B a	8.95 B b	0.20	9.66 B
82000	10.76 A a	10.21 A b	9.64 A c	0.23	10.20 A
s.e.d within columns	0.19	0.19	0.20		0.13
Mean across plant densities	10.34 a	9.91 a	9.11 b	0.18	

In 0.03-0.07 m depth, PR of ploughing and mulching treatment was significantly lower compared to direct drilling (Fig. 1 A). In the 0.13-0.18 and 0.23-0.27 m layers of mulching and direct drilling treatments, PR was significantly higher than values from plough tilled plots. No differences between tillage treatments occurred in 0.38-0.43 m depth.

Fig. 1: Effect of soil tillage on penetration resistance (A), dry bulk density (B), air filled pore volume (C) and plant available water content (D) in topsoil (0.03-0.07 m, 0.13-0.18 m, 0.23-0.27 m) and subsoil (0.38-0.43 m), means of five environments. Means with the same letter indicate not significant differences between tillage treatments within one depth at  $\alpha = 0.05$ .



In the uppermost layer (0.03-0.07 m), DBD of ploughing and mulching treatments accounted for about  $1.35 \text{ Mg m}^{-3}$  (Fig. 1 B), while values from directly drilled plots were significantly higher at  $1.5 \text{ Mg m}^{-3}$ . In 0.13-0.18 and 0.23-0.27 m bulk density ranged from

1.4-1.47 Mg m<sup>-3</sup> in the ploughed plots, but significantly increased to 1.55-1.6 Mg m<sup>-3</sup> in the treatments mulching and direct drilling. No tillage effects were observed in the subsoil layer (0.38-0.43 m).

In the ploughing treatment, AFPV continuously decreased with increasing soil depth from about 16 % to 7 % (Fig. 1 C). In contrast, values of mulching and direct drilling treatments were close to 6-7 % in all layers except 0.03-0.07 m depth in mulching treatment, where AFPV was 10 %. Tillage effects on AFPV were significant in the two upper soil layers.

In contrast to the other parameters, tillage effects on PAWC were much less pronounced in all depth (Fig. 1 D). For ploughing and direct drilling treatment, data ranged between 14 and 17 %, while mulching treatment revealed higher (20 %) and lower (12 %) values in 0.03-0.07 m and 0.38-0.43 m depth, respectively.

The coefficients of Spearman's rank correlation revealed significantly negative correlations between WSY and PR in 0.03-0.07, 0.13-0.18, 0.23-0.27 m depth (Tab. 4). Correspondingly, WSY and DBD in the 0.03-0.07 m and 0.13-0.18 m layer were negatively correlated, while AFPV from these horizons exhibited a positive correlation to yield. The highest coefficient of correlation observed was 0.78 for the relation of WSY and AFPV in 0.03-0.07 m depth. However, no correlation was detected between WSY and PAWC at any depth, and any parameter from 0.38-0.43 m soil depth, respectively.

Tab. 4: Coefficients of Spearman's rank correlation between white sugar yield (WSY, adjusted for plant density and centred for environment effects), dry bulk density (DBD), penetration resistance (PR), air filled pore volume (AFPV) and plant available water capacity (PAWC) in different depths (1-4). Correlation coefficients with  $|r| > 0.51$  are significant at  $\alpha = 0.05$  and marked with bold font.

	DBD 1	PR 1	AFPV 1	PAWC 1	DBD 2	PR 2	AFPV 2	PAWC 2	DBD 3	PR 3	AFPV 3	PAWC 3	DBD 4	PR 4	AFPV 4	PAWC 4	WSY
DBD 1	1	<b>0.68</b>	<b>-0.84</b>	-0.28	0.31	0.33	-0.45	-0.42	0.07	0.31	0.05	-0.39	<b>-0.62</b>	-0.10	0.50	0.11	<b>-0.64</b>
PR 1	<b>0.68</b>	1	<b>-0.61</b>	-0.40	<b>0.63</b>	<b>0.64</b>	<b>-0.63</b>	<b>-0.72</b>	0.45	<b>0.60</b>	-0.31	<b>-0.76</b>	<b>-0.53</b>	-0.19	0.00	-0.47	<b>-0.65</b>
AFPV 1	<b>-0.84</b>	<b>-0.61</b>	1	-0.09	-0.41	<b>-0.53</b>	<b>0.74</b>	0.17	-0.22	<b>-0.58</b>	0.25	0.16	<b>0.61</b>	-0.08	-0.20	-0.27	<b>0.78</b>
PAWC 1	-0.28	-0.40	-0.09	1	0.10	0.11	-0.04	<b>0.85</b>	0.20	0.15	0.05	<b>0.73</b>	0.46	0.49	-0.39	<b>0.55</b>	-0.06
DBD 2	0.31	<b>0.63</b>	-0.41	0.10	1	<b>0.86</b>	<b>-0.71</b>	-0.32	<b>0.84</b>	<b>0.83</b>	-0.27	-0.48	-0.07	-0.02	-0.02	-0.15	<b>-0.58</b>
PR 2	0.33	<b>0.64</b>	<b>-0.53</b>	0.11	<b>0.86</b>	1	<b>-0.79</b>	-0.28	<b>0.88</b>	<b>0.97</b>	<b>-0.53</b>	-0.43	-0.16	0.01	-0.25	-0.11	<b>-0.52</b>
AFPV 2	-0.45	<b>-0.63</b>	<b>0.74</b>	-0.04	<b>-0.71</b>	<b>-0.79</b>	1	0.31	<b>-0.56</b>	<b>-0.87</b>	<b>0.54</b>	0.41	<b>0.52</b>	-0.01	0.00	0.00	<b>0.65</b>
PAWC 2	-0.42	<b>-0.72</b>	0.17	<b>0.85</b>	-0.32	-0.28	0.31	1	-0.14	-0.24	0.23	<b>0.90</b>	0.51	<b>0.62</b>	-0.28	<b>0.65</b>	0.25
DBD 3	0.07	0.45	-0.22	0.20	<b>0.84</b>	<b>0.88</b>	<b>-0.56</b>	-0.14	1	<b>0.82</b>	-0.51	-0.29	0.21	0.15	-0.30	-0.09	-0.38
PR 3	0.31	<b>0.60</b>	<b>-0.58</b>	0.15	<b>0.83</b>	<b>0.97</b>	<b>-0.87</b>	-0.24	<b>0.82</b>	1	<b>-0.55</b>	-0.38	-0.21	0.05	-0.25	-0.09	<b>-0.55</b>
AFPV 3	0.05	-0.31	0.25	0.05	-0.27	<b>-0.53</b>	<b>0.54</b>	0.23	-0.51	<b>-0.55</b>	1	0.25	0.25	-0.21	0.41	0.17	0.13
PAWC 3	-0.39	<b>-0.76</b>	0.16	<b>0.73</b>	-0.48	-0.43	0.41	<b>0.90</b>	-0.29	-0.38	0.25	1	<b>0.55</b>	0.43	-0.14	<b>0.69</b>	0.16
DBD 4	<b>-0.62</b>	<b>-0.53</b>	<b>0.61</b>	0.46	-0.07	-0.16	<b>0.52</b>	0.51	0.21	-0.21	0.25	<b>0.55</b>	1	0.11	-0.28	0.13	0.24
PR 4	-0.10	-0.19	-0.08	0.49	-0.02	0.01	-0.01	<b>0.62</b>	0.15	0.05	-0.21	0.43	0.11	1	-0.29	0.42	0.07
AFPV 4	0.50	0.00	-0.20	-0.39	-0.02	-0.25	0.00	-0.28	-0.30	-0.25	0.41	-0.14	-0.28	-0.29	1	0.24	-0.18
PAWC 4	0.11	-0.47	-0.27	<b>0.55</b>	-0.15	-0.11	0.00	<b>0.65</b>	-0.09	-0.09	0.17	<b>0.69</b>	0.13	0.42	0.24	1	-0.07
WSY	<b>-0.64</b>	<b>-0.65</b>	<b>0.78</b>	-0.06	<b>-0.58</b>	<b>-0.52</b>	<b>0.65</b>	0.25	-0.38	<b>-0.55</b>	0.13	0.16	0.24	0.07	-0.18	-0.07	1
Depth	1 = 0.03-0.07 m				2 = 0.13-0.18 m				3 = 0.23-0.27 m				4 = 0.38-0.43 m				

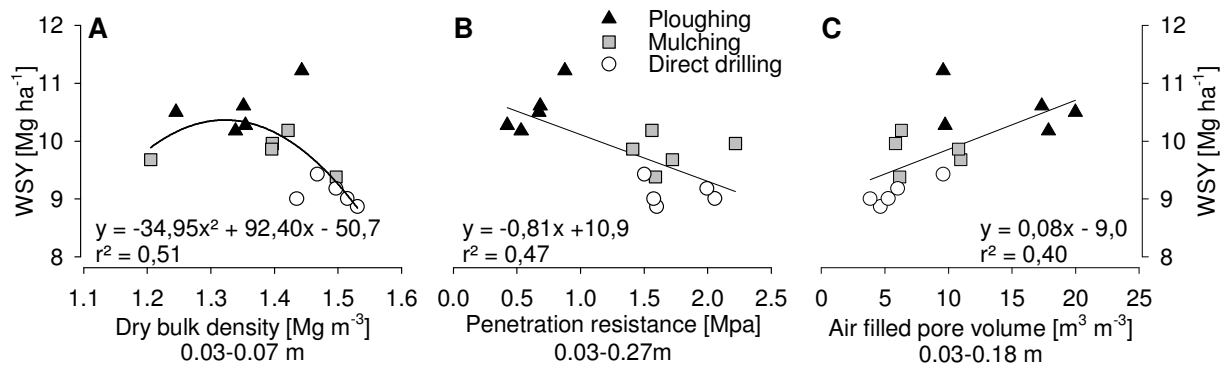
Within each of the three upper layers PR, DBD and AFPV were closely correlated to each other, either positively or negatively (Tab. 4). Data of the same parameter were usually closely correlated from one sampling depth to the next below, but solely within the topsoil down to 0.27 m. Moreover, PR values from 0.03-0.07 m depth correlated positively to DBD from the 0.13-0.18 and 0.23-0.27 m layer, but negatively to AFPV and PAWC, respectively. A similar correlation pattern was detected for the layer 0.13-0.18 m vs. 0.23-0.27 m depth, but not between any topsoil layer and the 0.38-0.43 m horizon. Finally, PAWC values auto-correlated over depth but were mostly not correlated to other soil properties.

Based on the results of the correlation analysis essential relations of WSY to soil physical parameters were selected and presented in Fig. 2. The relation between WSY and DBD in



0.03-0.07 m depth was described best by a quadratic regression, showing a slight increase of WSY up to its maximum at a DBD of 1.25-1.35  $\text{Mg m}^{-3}$ , and a remarkable decrease of WSY of more than 1  $\text{Mg ha}^{-1}$  with further increase of DBD to 1.50  $\text{Mg m}^{-3}$  (Fig. 2 A). The relation between WSY and PR as well as AFPV, respectively, was best described by a linear regression with a slope of about -0.8 for PR and 0.08 for AFPV (Fig. 2 A, B).

Fig. 2: Relation between dry bulk density in 0.03-0.07 m (A), penetration resistance in 0.03-0.27 m (B), air filled pore volume in 0.03-0.18 m (C) and white sugar yield (adjusted for plant density and centred for environment effects), five environments. Regressions A and C are significant at  $\alpha = 0.05$ , regression B is significant  $\alpha = 0.01$ .



The introduction of several single soil parameters as covariates to the fixed model analysis of variance/covariance explained approximately 60 % of yield variation attributed to soil tillage (not shown). However, combining the parameters (i) DBD from 0.03-0.07 m depth with a linear and a quadratic term, (ii) mean of PR from the three layers between 0.03-0.27 m (linear) and (iii) mean of AFPV from the two horizons in the 0.03-0.18 m layer (linear) decreased the sum of squares attributed to soil tillage plus environment  $\times$  soil tillage from 42.6 to 9.3 (Tab. 5). This reduction accounted for 77 % of the initial value.

Tab. 5: Splitting up sum of squares for white sugar yield [ $\text{Mg ha}^{-1}$ ] by analysis of variance without covariates compared to analysis of covariance with selected soil parameters as covariates (fixed effects model).

Source	*DF	Sum of squares without covariates	DF	Sum of squares with covariates
Plant density (PD)	1	20.7	1	20.7
Environment (E)	4	463.2	4	461.3
Covariates				
Dry bulk density (DBD) 0.03-0.07 m, DBD 0.03-0.07m x DBD 0.03-0.07 m, Air filled pore volume 0.03-0.18 m, Penetration resistance 0.03-0.27 m			4	32.8
Soil tillage (ST)	2	36.1	2	6.7
E x ST	8	6.5	4	2.6
PD x ST	2	2.1	2	2.1
PD x E	4	3.1	4	3.1
PD x E x ST	8	4.1	8	4.1
Error	113	36	113	36

\* degrees of freedom

#### 4 Discussion

Plant density is well known to affect sugar beet yield and quality under European growing conditions. A population density exceeding  $75.000 \text{ plants ha}^{-1}$  is required to obtain high root yield and sugar content, and low impurity concentration (Bürcky and Winner, 1986; Märländer, 1990; Bee and Jaggard, 1996). Few and small gaps in the plant stand assure rapid and complete foliage cover, which is required for high radiation interception and thus high yield (Steven et al., 1986; Märländer and Röver, 1994). Several investigations of soil tillage effects on sugar beet growth and yield have shown that reduced tillage practices and direct drilling may decrease plant population, and simultaneously, crop yield (Richard et al., 1995; Liebhard, 1997; Pringas and Märländer, 2004). But, it has never been elucidated by a comprehensive experimental approach whether differences in plant population explain yield decrease completely or only partly. In our study, plant density experiments were introduced to long-term tillage trials. This allows separation between population and other effects related to tillage eventually causing yield differences between tillage treatments.

The results given in Tab. 2 clearly prove that population effects act in addition to other effects related to reduced tillage practices. Furthermore, population and other effects must be regarded as independent from each other because no interaction between the experimental factors plant population and tillage occurred.

These findings are confirmed by results from Dieckmann et al. (2006) showing the magnitude of yield losses caused by direct drilling (12 % compared to mouldboard ploughing) amounts to the two fold of yield losses attributed to lower plant population as can be derived from Märlander (1990). Moreover, several reduced tillage experiments revealed lower yield of sugar beet even if plant population was equal between tillage treatments (Tomanová et al., 2006). Conclusively, for many investigations decreased sugar beet yield coming along with reduced tillage is assumed to be partly caused by lower plant population but far not completely (Baeumer and Pape, 1972; Ahl et al., 1998; Liebhard, 1997).

For further clarification of yield depression due to reduced tillage, soil physical properties were extensively assessed in our investigation (Fig. 1). Like in many other studies mulching treatment (0.1-0.15 m deep) and direct drilling increased PR and DBD. Simultaneously AFPV decreased in the untilled layers of the topsoil compared to deep (mouldboard) ploughing (Ehlers et al., 1983; Radcliffe et al., 1988; Unger and Jones, 1998; Rasmussen, 1999; Tebrügge and Düring, 1999). Correlation analysis revealed that PR and DBD data were closely correlated in layers down to 0.27 m depth (Tab. 4). PR is known to be affected by texture, moisture and DBD of soil (Boone and Veen, 1994; Coelho et al., 2000). In our investigations, PR was determined in plots with very similar soil texture within environment. Moreover, measurements were carried out in spring when the soil moisture content was close to field capacity in all treatments. Therefore, it is likely that the higher PR in the topsoil of mulching and direct drilling compared with ploughing treatments is caused by higher DBD.

Similarly, AFPV and PR, and moreover, AFPV and DBD were closely correlated indicating that increasing PR and DBD due to reduced tillage intensity is related to losses of coarse pore volume (Carter and Ball, 1993). Mouldboard ploughing (0.25-0.3 m) and rigid-tine cultivation (0.1-0.15 m) obviously counteracted the natural processes of soil settlement, and moreover, the compactive forces exerted by machinery used for crop and soil management (Lampurlanés and Cantero-Martínez, 2003).

PAWC was just slightly affected by tillage treatments (Fig. 1). In the uppermost soil layer of mulching and direct drilling plots water holding capacity was affected positively compared to ploughing. This likely was caused by the increased soil organic carbon content observed by Dieckmann and Koch (2008) due to shallow crop residue incorporation. PAWC did not correlate to any other soil parameter (Tab. 4).

WSY was negatively correlated to PR from the three upper sampling layers (0.03-0.27 m) and DBD from the two upper soil horizons (0.03-0.18 m). While these correlations appeared to be strictly linear, WSY and DBD from the uppermost layer were fitted best by a quadratic regression (Tab. 4, Fig. 2). Furthermore, WSY was positively correlated to AFPV from the two upper soil horizons. Adding these three parameters to analysis of variance in terms of covariates decreased the variance caused by soil tillage by about 77 %. No correlations were detected between WSY and subsoil properties.

High soil strength as indicated by high values of PR is known to decrease fibrous root growth (Ehlers, 1996). Depending on crop species, soil type and experimental approach root growth is reported to cease completely at PR values ranging from 0.8 MPa (Greacen et al., 1969) to 7 MPa (Gerard et al., 1982). For field conditions Ehlers et al. (1983) showed that roots of spring oats stopped growing when PR exceeded 3.6 MPa in tilled soils and 4.6-5.1 MPa in non tilled loess soils, respectively. Materechera et al. (1991) reported a threshold value of 4.2 MPa for root growth of several mono- and dicotyledonous crop species. Liebhard et al. (1995) observed that root growth of sugar beet, maize and wheat

was diminished at PR exceeding 1.9 MPa. This value is considered as growth retardant by Atwell (1993) as well.

In our study, PR of the ploughing treatment was very uniform over the top 0.25 m soil horizon and accounted for about 0.6 MPa. In contrast, data from direct drilling and mulching treatments revealed a pronounced stratification with increasing values from the soil surface to about 0.15 m depth. Further down to 0.25 m, values constantly remained at a level of about 2 MPa. These differences were reflected by decreasing WSY from ploughing to mulching and direct drilling treatment. With regard to the threshold values discussed above, critical values for sugar beet fibrous root growth of 2 MPa were exceeded just slightly. These findings were confirmed by the results from a visual soil structure assessment (Anonymous, 2005) revealing no differences in root growth intensity between tillage treatment (Teiwes, 2003, 2004, 2005). In order to penetrate the soil, plant roots are able to make use of inter- and intraaggregate soil pores. Thus, root PR is probably below that of soil PR detected by a large rigid cone (Ehlers, 1983). As ploughless soil cultivation treatments presumably did not limit fibrous root growth, mulching and direct drilling treatments were not likely to restrict the plants' nutrient and water uptake. Shortages in nutrient supply as potential causes for yield decrease of sugar beet grown with shallow-mixing conservation tillage have been comprehensively investigated by Tomanová et al. (2006). The authors concluded from plant analyses during the growing season that N, P, K and Mg supply of plants did not limit growth on a loessial soil if the fertilization system was well adapted. Likewise, optimum fertilizer regimes were used in our study. Correspondingly, data on plant available nutrient concentrations in the soil obtained from our experiments gave no indication for restricted nutrient supply with reduced tillage and direct drilling (Dieckmann and Koch, 2008).

Moreover, DBD was applied in several studies to characterise soil strength affecting crop growth. Czeratzki (1972) and Petelkau et al. (2000) identified DBD values ranging from

1.35 to 1.48 Mg m<sup>-3</sup> as optimum for sugar beet growth on loessial/loamy soils. Both, lower and higher values were shown to reduce yield. Jaggard (1977) and Draycott (1970) observed an exponential yield decline for sugar beet if DBD exceeded a threshold value of 1.5 Mg m<sup>-3</sup> on average of the 0-0.16 m layer of sandy and clayey loam soils.

In the upper 0.25 m soil layer of our study sites, DBD variation between tillage treatments closely followed PR. In contrast to PR, DBD measured from 0.13 to 0.27 m depth in mulching and direct drilling plots (1.55-1.6 Mg m<sup>-3</sup>) substantially exceeded the threshold of 1.5 Mg m<sup>-3</sup> as discussed above. Even in the 0.03-0.07 m layer of direct drilling treatment DBD accounted for nearly 1.5 Mg m<sup>-3</sup>, which indicates limitations for crop growth while values from both, ploughing and mulching treatments were considerably lower.

Moreover, increasing soil strength came along with diminishing values of AFPV which has also been reported by Carter and Ball (1993). In the topsoil, AFPV of 10 m<sup>3</sup> 100 m<sup>-3</sup> is regarded minimal for optimum sugar beet growth (Czeratzki, 1972). Low AFPV may retard warming of soils after winter (Richard et al., 1995) thereby decreasing early development of sugar beet plants (Stockfisch et al., 2002), and furthermore, limit oxygen supply of crop roots (Hartge, 1965; Geisler, 1969; Mohr, 1978). In our study, in the uppermost sampling depth of direct drilling treatment and in the 0.13-0.27 m layer of mulching and direct drilling plots AFPV values resulted below the minimum threshold of 10 m<sup>3</sup> 100 m<sup>-3</sup>. This was accompanied by a substantial yield decrease. Nevertheless, a reduction of early plant development was negligible in our trials. Moreover, Tomanová et al. (2006) detected that early sugar beet growth was improved with shallow-mixing conservation tillage on a fertile loessial soil, even though final yield was significantly lower with reduced tillage. The authors hypothesised, that soil structural properties relevant for secondary thickening of the taproot may have limited yield formation.

Conclusively, the effect of tillage on sugar beet yield was clearly related to structural properties, especially of the uppermost decimetre of soil. This is emphasised by the close

correlation obtained for WSY and PR, DBD and AFPV in this layer. For deeper layers, these correlations became continuously weaker, and completely disappeared for the subsoil. But, clear cause-and-effect mechanisms could not be detected in this field study, because important soil structural parameters were strongly collinear. This previously has been stated by Liebhard et al. (1997).

Nevertheless, it can be stated that in soils included in this study nutrient and water supply appeared not to be a limiting factor for sugar beet growth under direct drilling conditions. It is well known that soil strength may affect crop growth by signalling from root to shoot: Root caps are able to detect high soil strength causing an elevated level of abscisic acid in the leaves, which in turn causes stomatal closure and reduction of net photosynthesis rate (Tardieu et al., 1991; Masle et al., 1990). Moreover, secondary thickening growth of the sugar beet tap root may involve specific processes that are sensitive to elevated soil strength. Gliemerth (1953) and Rydberg (1992) reported that sugar beet react to unfavourable soil structure with increased forking and fanging of the tap root. Similarly, we observed that mulching and direct drilling treatments caused more pronounced fanginess of tap roots and furthermore, elevated crown height above soil surface of beet plants compared to ploughing treatment. Hanus and Bernard (1964) found that the amount of fangy taproots increased with decreasing air permeability in the soil. Further clarification of the plant physiological background of sugar beet specific growth and yield responses to a variety of soil structural states requires detailed model experiments separating the effects of soil strength, oxygen supply, etc.

## **Conclusions**

Our results prove that sugar beet yield decrease caused by low population density does not interact with the soil tillage applied. At least 82.000 plants ha<sup>-1</sup> at fairly even spacing are a prerequisite for high sugar yield. When sugar beet are grown after winter wheat large amounts of straw remain usually on the field which, in addition, might be unequally distributed by the combine harvester. Under such conditions a single pass for seedbed preparation as conducted in the direct drilling treatment of our experiment is obviously unable to generate favourable conditions for embedding of seeds, field emergence and plant establishment, although the seeders applied were best available technique. Moreover, elevated soil strength and/or reduced oxygen supply for plants connected with very shallow tillage is likely to limit sugar beet yield on loessial soils. Thus, farmers are currently recommended to assure favourable soil structural conditions for beet growth by 0.15-0.20 m deep tillage conducted in the previous autumn. In addition, seedbed preparation in spring will secure high field emergence. Unfortunately, these measures conflict with control of water erosion by high soil surface cover from crop residues.

## **Acknowledgement**

Special thanks are dedicated to Dir. H. Miller from the department of agriculture of Südzucker AG for enabling the trials. We also appreciate the unrelenting assistance of I. Wiese, W. Hübener and M. Jordan for soil core sampling and sugar beet hand harvesting, and the farm managers for carrying out crop management. Support by the Bavarian State Research Centre for Agriculture for providing soil analyses is appreciated. Funding by "Kuratorium für Versuchswesen und Beratung im Zuckerrübenanbau, Ochsenfurt" is gratefully acknowledged.



## 5 References

- Ahl, C., Joergensen, R.G., Kandeler, E., Meyer, B., Woehler, V., 1998. Microbial biomass and activity in silt and sand loams after long-term shallow tillage in central Germany. *Soil Till. Res.* 49, 93-104.
- Anonymus, 2005. *Bodenkundliche Kartieranleitung*, 5. Auflage. Arbeitsgruppe Boden, Ed.: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe sowie Geologische Landesämter in der Bundesrepublik Deutschland, Hannover.
- Atwell, B.J., 1993. Response of roots to mechanical impedance. *Environ. Exp. Bot.* 33, 27–40.
- Baeumer, K., Pape, G., 1972. Ergebnisse und Aussichten des Anbaus von Zuckerrüben im Ackerbausystem ohne Bodenbearbeitung. *Zucker* 25, 711-718.
- Bee, P., Jaggard, K., 1996. Plant populations for today's conditions. *Brit. Sugar Beet Rev.* 64, 28-30.
- Blake, G.R., Hartge, K.H., 1986. Particle density. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of soil analysis. Part 1.* 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI, pp. 377–382.
- Boone, F.R., Veen, B.W., 1994. Mechanisms of crop responses to soil compaction. In: Soane, B.D., van Ouwerkerk, C. (Eds.), *Soil compaction in crop production.* Elsevier, New York (ISBN 0-444-88286-3), pp. 237-264.
- Bürcky, K., Winner, C., 1986. The effect of plant population on yield and quality of sugar beet at different harvesting data (in German). *J. Agron. Crop Sci.* 157, 264-272.
- Capriel, P., 2005. Humusversorgung der Böden. <http://www.lfl.bayern.de/internet/stmlf/lfl/iab/bodenbearbeitung/13479/index.php>, visited at 23.10.2006.
- Carter, M.R., Ball, B.C., 1993. Soil porosity. In: Carter, M.R. (Ed.) *Soil sampling and methods of analysis.* Lewis Publ., Boca Raton, FL, pp. 581–588.
- Coelho, M.B., Mateos, L., Villalobos, F.J., 2000. Influence of a compacted loam subsoil layer on growth and yield of irrigated cotton in southern Spain. *Soil Till. Res.* 57, 129-142.
- Czeratzki, W., 1972. Die Ansprüche der Pflanze an den physikalischen Bodenzustand. *Landbauforsch. Volk.* 22, 29-36.
- Draycott, A.P., Hull, R., Messem, A.B., Webb, D.J., 1970. Effects of soil compaction on yield and fertilizer requirement of sugar beet. *J. Agr. Sci.* 75, 533-537.
- Dieckmann, J., Koch, H.-J., 2008. Influence of continuous minimum tillage on soil chemical properties and sugar beet yield (in German). *German J. Agron.* 12, 22-31.
- Dieckmann, J., Miller, H., Koch, H.-J., 2006. Beet growth and soil structure – results from a long term on-farm joint research project (in German). *Sugar Ind.* 131, 642-654.
- Ehlers, W., 1996. *Wasser in Boden und Pflanze.* Ulmer, Stuttgart, ISBN 3-80001-4118-3.
- Ehlers, W., Köpke, U., Hesse, F., Böhm, W., 1983. Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soils. *Soil Till. Res.* 3, 261-275.

- Epperlein, J., 2001. Vergleichende Untersuchungen zum Einfluss konservierender Bodenbearbeitung auf ausgewählte biologische und physikalische Bodenparameter im Biosphärenreservat Schorfheide-Chorin. PhD thesis, Univ. Berlin.
- Freibauer, A., Rounsevell, M.D.A., Smith, P., Verhagen, J., 2004. Carbon sequestration in the agricultural soils of Europe. *Geoderma* 122, 1-23.
- Geisler, G., 1969. Einfluß der Sauerstoffkonzentration ( $O_2$ ) in der Bodenluft auf das Wurzellängenwachstum und die Trockensubstanzbildung von Mais, Gerste und Ackerbohnen bei verschiedenem Bodenwassergehalt. *Z. Acker Pflanzenbau* 130, 189-202.
- Gerard, C.J., Sexton, X., Shaw, G., 1982. Physical factors influencing soil strength and root growth. *Agron. J.* 74, 875–879.
- Gisi, U., Schenker, R., Schulin, R., Stadelmann, X.F., Sticher, H., 1997. *Bodenökologie*. Thieme Verlag, Stuttgart, New York (ISBN 3-13-747202-4), pp. 351.
- Gliemeroth, G., 1953. Beinigkeit und Wurzelwachstum der Zuckerrübe. *Zucker* 6, 573-578.
- Greacen, E.L., Barley, K.P., Farrell, D.A., 1969. Mechanics of root growth in soils with particular reference to the implications for root distribution. In: Whittington, W.J. (Ed.), *Root Growth*. Butterworths, London, pp. 256-269.
- Hanus, H., Bernard, H., 1964. Untersuchungen an Pflugsohlenverdichtungen mit verschiedenen Methoden. *Min. Ernährg., Landw., Forsten NRW, Schriftenreihe Forschung und Beratung, Reihe B*, 10, 35-49.
- Hartge, K.H., 1965. Die Bestimmung von Porenvolumen und Porengrößenverteilung. *Z. Kulturtech. Flurber.* 6, 193-206.
- Hoffmann, C., 1997. Growth analysis of sugar beet plants in long-term reduced tillage (in German). *German J. Agron.* 1, 164-170.
- Hoffmann, C., 2006. Zuckerrüben als Rohstoff. Die technische Qualität als Voraussetzung für eine effiziente Verarbeitung. *Habil. thesis Univ. Göttingen*, ISBN 3-930333-87-2.
- Jaggard, K.W., 1977. Effects of soil density on yield and fertilizer requirement of sugar beet. *Ann. Appl. Biol.* 86, 301-312.
- Kenward, M.G., Roger, J.H., 1997. Small sample inference for fixed effects from restricted maximum likelihood. *Biometrics* 53, 983-997.
- Kreuter, T., 2006. Zum Einfluss der Bodenbearbeitung auf ausgewählte Elemente des Bodenlebens.  
[http://www.landwirtschaft.sachsen.de/de/wu/Landwirtschaft/lfl/inhalt/7105\\_7110.htm](http://www.landwirtschaft.sachsen.de/de/wu/Landwirtschaft/lfl/inhalt/7105_7110.htm)  
, visited at 05.12.2006.
- Lampurlanés, J., Cantero-Martínez, C., 2003. Soil bulk density and PR under different tillage and crop management systems and their relationship with barely root growth. *Agron. J.* 95, 526–533.
- Lindstrom, M.J., Archer, D.W., 2003. Crop residue management in the United States. *Landbauforschung Voelkenrode Sonderheft. V* 256, 11-16.

- Liebhard, P., Eitzinger, J., Klaghofer, E., 1995. Einfluß der Primärbodenbearbeitung auf Aggregatstabilität und Eindringwiderstand im oberösterreichischen Zentralraum (Teil 5). *Bodenkultur* 46, 1-18.
- Liebhard, P., 1997. Einfluss der Primärbodenbearbeitung auf Ertrag, Ertragsverhalten und ausgewählte Qualitätskriterien von Zuckerrübe (*Beta vulgaris* L. ssp. *vulgaris* var. *altissima* Doell) im oberösterreichischen Zentralraum (Teil 8). *Bodenkultur* 48, 3-14.
- Littell, R. C., Milliken, G.A., Stroup, W.W. and Wolfinger, R.D., 1996. SAS System for mixed models. Cary, NC: Sas Institute.
- Longford, N.T., 1993. Random coefficient models. Oxford, Clarendon Press.
- Maidl, F. X., Knittel, H., Fischbeck, G., 1982. Der Einfluß des Bodengefüges auf die Ertragsbildung von Zuckerrüben. *J. Agron. Crop Sci.* 151, 275—281.
- Märländer, B., 1990. Einfluss der Bestandesdichte auf Ertrags- und Qualitätskriterien sowie über mögliche Ursachen der Konkurrenz in Zuckerrübenbeständen. *J. Agron. Crop Sci.* 164, 120-130.
- Märländer, B., Hoffmann, C., Koch, H.-J., Ladewig, E., Merkes, R., Petersen, J., Stockfisch, N., 2003. Environmental situation and yield performance of sugar beet crop in Germany: Heading for sustainable development. *J. Agron. Crop Sci.* 189, 201-226.
- Märländer, B., Röver, A., 1994. Einfluß von Sorte und Bestandesdichte auf Ertrag und Qualität von Zuckerrüben – ein Beitrag zur Lichtkonkurrenz (in German). *Sugar Ind.* 119, 39-47
- Masle, J., Farquar, G.D., Gifford, R.M., 1990. Growth and carbon economy of wheat seedlings as affected by soil resistance to penetration. *Aust. J. Plant Physiol.* 17, 456-487.
- Materechera, S.A., Dexter, A.R., Alston, A.M., 1991. Penetration of very strong soils by seedling roots of different plant species. *Plant Soil* 135, 31-41.
- Mohr, H.D., 1978. Die Durchwurzelung von Böden in Abhängigkeit von wichtigen Bodeneigenschaften. *Kali-Briefe* 14, 103-113.
- Nail, E.L., Young, D.L., Schillinger, W.F., 2007. Diesel and glyphosate price changes benefit the economics of conservation tillage versus traditional tillage. *Soil Till. Res.* 94, 321-327.
- Pekrun, C., Kaul, H.-P., Claupein, W., 2003. Soil Tillage for sustainable nutrient management. In: El Titi, A. (Ed.), *Soil Tillage in Agroecosystems*, CRC Press (ISBN 0-8493-1228-0), pp. 115-146.
- Petelkau, H., Frielinghaus, M., Seidel, K., Thiere, J., 2000. Indikationskonzept zur Ableitung von Schadverdichtungsgefährdungsklassen nach der mechanischen Belastbarkeit der Böden für Nordostdeutschland. ZALF Müncheberg.
- Pringas, C., Märländer, B., 2004. Effect of conservation tillage on yield, quality, rentability and *Cercospora* infestation of sugar beet – Results from 9 Years of On-Farm Research (in German). *German J. Agron.* 8, 82-90.

- Radcliffe, D.E., Tollner, E.W., Hargrove, W.L., Clark, R.L., Golabi, M.H., 1988. Effect of tillage practices on infiltration and soil strength of a typic Hapludult soil after ten years. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 3, 798-804.
- Rasmussen, K.J., 1999. Impact of ploughless soil tillage on yield and soil quality: A Scandinavian review. *Soil Till. Res.* 53, 3-14.
- Richard, G., Boiffin, J., Duval, Y., 1995. Direct drilling of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) into a cover crop: effects on soil physical conditions and crop establishment. *Soil Till. Res.* 34, 169-185.
- Rydberg, T., 1992. Ploughless tillage in Sweden. Results and experiences from 15 years of field trials. *Soil Till. Res.* 22, 253-264.
- Schlichting, E., Blume, H.-P., Stahr, K., 1995. *Bodenkundliches Praktikum*. Blackwell, Berlin, 2. Auflage (ISBN 3-8263-3042-0), pp. 295.
- Schmidt, W., Nitzsche, O., Krück, S., Richter, W., 2002. Water erosion protection of sugar beet sites through conservation tillage and mulch seeding (in German). *Proc. 65th IIRB Congress Brussels*, 47-58.
- Steven, M.D., Biscoe, P.V., Jaggard, K.W., Paruntu, J., 1986. Foliage cover and radiation interception. *Field Crop Res.* 13, 75-87.
- Stockfisch, N., Koch, H.-J., Märländer, B., 2002. Effects of weather on growth and dry matter yield of sugar beet (in German). *German J. Agron.* 6, 63–71
- Tardieu, F., Katerji, N., Bethenod, O., Zhang, J., Davies, W.J., 1991. Maize stomatal conductance in the field: its relationship with soil and plant water potentials, mechanical constraints and ABA concentration in the xylem sap. *Plant Cell Environ.* 14, 121–126.
- Tebrügge, F., Düring, R.-A., 1999. Reducing tillage intensity - a review of results from a long-term study in Germany. *Soil Till. Res.* 53, 15-28.
- Teiwes, K., 2003. Auswahl repräsentativer Messfelder auf Versuchsflächen der Südzucker AG; Friemar und Grombach. (personal communication).
- Teiwes, K., 2004. Packungsdichten des Bodens und Auswahl repräsentativer Messfelder auf Versuchsflächen der Südzucker AG zur Bodenbearbeitung; Friemar, Grombach, Sailtheim und Insultheim. (personal communication).
- Teiwes, K., 2005. Packungsdichten des Bodens und Auswahl repräsentativer Messfelder auf Versuchsflächen der Südzucker AG zur Bodenbearbeitung; Sailtheim, Insultheim, Lüttewitz und Zschortau. (personal communication).
- Tomanová, O., Stockfisch, N., Koch, H.-J., 2006: Impact of continuous ploughless tillage on growth and nutrient supply of sugarbeet during the growing season (in German). *German J. Agron.* 10, 16-25.
- Unger, P.W., Jones, O.R., 1998. Long-term tillage and cropping systems affect bulk density and penetration resistance of soil cropped to dryland wheat and grain sorghum. *Soil Till. Res.* 45, 39–57.

Waldorf, N.V., Schulze, R., 2003. Auswirkungen verschiedener Bodenbearbeitungsverfahren auf pflanzenbauliche Parameter. Landinfo 9, 6-10.

Wolfinger, R.D., 1996. Heterogeneous variance-covariance structures for repeated measures. J. Agr. Biol. Environ. Stat. 1, 205–230.

## V Epilog

### Einleitung

Der Boden ist die zentrale Lebensgrundlage für Pflanzen und damit auch von essentieller Bedeutung für das Leben von Mensch und Tier (BEESE, 1997, FRIELINGHAUS & GRIMME, 1999). Während der Schutz des Bodens in den vergangenen Jahren hauptsächlich im Interesse des Bewirtschafters lag, rücken zunehmend die ökologisch relevanten Bodenfunktionen in das öffentliche Interesse, deren Bedeutung in den letzten Jahren durch prognostizierte Veränderungen des Klimas (IPCC, 2007) deutlich zugenommen hat. Nach Einschätzung britischer Forscher hat der vom Menschen verursachte Klimawandel die Wahrscheinlichkeit des Eintreffens klimabedingter Naturkatastrophen verdoppelt (STOTT et al., 2004). Daraus ergibt sich in weiten Teilen der Erde eine steigende Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Bodenerosion (SCHOLZ et al., 2007). Aus den gesellschaftlichen Folgen resultiert, in Verbindung mit einem gesteigerten Umweltbewusstsein, die Forderung nach einer bestmöglichen Vermeidung potentieller nutzungsbedingter Schäden aus der ackerbaulichen Bodennutzung. In diesem Zusammenhang kann pfluglose Bodenbearbeitung einen wertvollen Beitrag zur Vorsorge gegen Bodenerosion und -verdichtung leisten (SOMMER, 1998, BMVEL, 2001). Allerdings müssen für eine nachhaltige Entwicklung der Landwirtschaft ökologische, ökonomische und soziale Aspekte gleichermaßen berücksichtigt werden (CHRISTEN, 1999). Somit sollten Bodenbearbeitungssysteme neben den Lebensraum- und Regelungsfunktionen des Bodens auch die Produktionsfunktion berücksichtigen. Dabei müssen Ertragsfähigkeit und die Erhaltung einer guten Bodenstruktur zur Wahrung der ökologischen Funktionsfähigkeit der Böden nicht im Widerspruch zueinander stehen.

In diesem Beitrag werden die vier in dieser Arbeit betrachteten langjährig differenziert bearbeiteten Bodenbearbeitungsverfahren Pflug, Locker, Mulch und Direktsaat zusammenfassend für die Versuchsdauer von 12 Jahren ökonomisch bewertet. Die Auswertung erfolgt getrennt für Zuckerrübe und Weizen, differenziert in Stoppel- und Rübenweizen, sowie über die gesamte Rotation.

Seit der Getreideernte 2006 ist die Nachfrage für Getreide kontinuierlich gewachsen und der Preis für Winterweizen an der Warenterminbörse stieg von  $100 \text{ € t}^{-1}$  auf  $250 \text{ € t}^{-1}$ . Angesichts steigender Energie- und damit Produktionskosten und dem wachsenden Getreidebedarf der Weltbevölkerung erwarten Experten auch mittelfristig deutlich höhere Preise als in der Vergangenheit. Demgegenüber ist der Preis für Zuckerrüben durch die Zuckermarktordnung (ZMO) festgeschrieben und durch deren Reform wird der Rübenmindestpreises von ehemals  $46,72 \text{ € t}^{-1}$  auf  $26,3 \text{ € t}^{-1}$  im Jahr 2010 sinken. Der starke Preisanstieg lässt vermuten, dass verfahrensbedingte Mindererträge künftig bei Getreide einen stärkeren Einfluss und bei Zuckerrüben infolge sinkender Erlöse einen geringeren Einfluss auf die Rentabilität haben. Die Produktionskosten sind analog zum Anstieg des Ölpreises für Kraft- und Schmierstoffe sowie der Kosten für Düngemittel ebenfalls stark gestiegen. Inwiefern sich die veränderten Erlöse und Kosten auf die Vorzüglichkeit einzelner Bodenbearbeitungsverfahren auswirken, wird abschließend analysiert.

### **Methodischer Ansatz**

Ständig ändernde Rahmenbedingungen in der Landwirtschaft erfordern Dauerversuche mit differenzierten Standort- und Witterungsbedingungen sowie den Einsatz praxisnaher Technik, um fundierte, allgemein gültige Aussagen zur Praktikabilität von Bodenbearbeitungsverfahren treffen zu können. Vor diesem Hintergrund wurde 1992 von der Südzucker AG eine Versuchsserie auf 10 landwirtschaftlichen Großbetrieben in Süd- und

Ostdeutschland angelegt. Auf ortsfesten Großparzellen von mindestens 2,5 ha Größe wurden Bodenbearbeitungsverfahren mit abnehmender Eingriffstiefe und somit sinkender Eingriffsintensität von Pflug (konventionell, 30 cm tief wendend gepflügt) über Locker (konservierend, 20-25 cm tief mischend), Mulch (konservierend, max. 15 cm tief mischend) bis Direktsaat (keine Bodenbearbeitung außer flacher Saatbettbearbeitung zur Zuckerrübe) in einer Zuckerrüben – Weizen – Weizen – Fruchtfolge auf ihre pflanzenbauliche und ökonomische Leistung geprüft. Mittlerweile liegen für Zuckerrüben 32 und für Winterweizen 53 Einzelergebnisse aus 12 Versuchsjahren vor. Diese umfangreiche Datengrundlage stellt eine einzigartige Basis für die Beurteilung langfristiger Auswirkungen pflugloser Bodenbearbeitungsverfahren dar.

Zur Kalkulation der Erlöse von Zuckerrüben wurde eine Mischpreiskalkulation nach EU-Preisliste für das jeweilige Anbaujahr aus 70 % A-Rüben zu 46,72 € t<sup>-1</sup>, 20 % B-Rüben zu 28,84 € t<sup>-1</sup> und 10 % C-Rüben (jahresabhängig zwischen 9 und 16,50 € t<sup>-1</sup>) vorgenommen, woraus sich ein durchschnittlicher Rübenmindestpreis von 42,5 € t<sup>-1</sup> errechnet. Dieser Grundpreis wurde um den Zuckergehalt (Basiszuckergehalt 16 %) inklusive einer Rübenmarkvergütung für A/B- und C-Rüben korrigiert. Der Erlöskalkulation beim Getreide lagen die Produktpreise des Anbaujahres inklusive der regional festgelegten Flächenprämie zugrunde. Dabei wurde je nach Vorfrucht zwischen Rüben- (Vorfrucht Zuckerrübe) und Stoppelweizen (Vorfrucht Getreide) differenziert. Für die Kalkulation der Verfahrenskosten wurden die Betriebsmittelpreise des Anbaujahres in Ansatz gebracht. Die variablen Maschinenkosten und der Bedarf an Arbeitszeit wurden auf Grundlage des KTBL (2003) berechnet. Die Rentabilitätsanalyse wurde in Form einer flächenbezogenen Deckungsbeitragsrechnung vorgenommen. Dazu wurden von der Marktleistung zunächst die proportionalen Spezialkosten (variable Maschinenkosten sowie Kosten für Saatgut, Düngung, Pflanzenschutz, Lohnmaschinen und der Zinsansatz für das gebundene



Umlaufkapital) abgezogen. Weiterhin wurden die festen Maschinenkosten (Abschreibung und Zinsansatz) sowie die Arbeitskosten subtrahiert und so der Vergleichsdeckungsbeitrag ermittelt.

Zur Simulation variabler Erlös- und Kostenstrukturen wurde die langjährige Versuchsauswertung zunächst mit veränderten Erzeugerpreisen durchgeführt. Nach Zuckermarktordnung wurden für 2006/2007 32,9 € t<sup>-1</sup>, für 2007/2008 29,8 € t<sup>-1</sup>, für 2008/2009 27,8 € t<sup>-1</sup> und für 2009/2010 26,3 € t<sup>-1</sup> als Rübenmindestpreis angenommen. Zusätzlich wurde mit einem fiktiven Preis von 24,0 € t<sup>-1</sup> für Ethanolrüben kalkuliert. Rübenmarkvergütung und Polarisationszuschlag wurden jeweils addiert. Für die einzelnen Reformstufen wurde ab 2006 die individuelle Flächenprämie (Ackerland Zahlungsanspruch ohne betriebsindividuellen Beitrag) der Bundesländer, in denen die Versuchsstandorte lagen, der Marktleistung der Zuckerrüben hinzugerechnet.

Steigende Produktionskosten wurden durch einen pauschalen Aufschlag von 30 % auf die Gesamtkosten simuliert. Da sich die Produktionskosten für Zuckerrüben zwischen den Bodenbearbeitungsverfahren nur geringfügig unterschieden, beschränken sich diese Auswertungen lediglich auf den Anbau von Weizen.

## **Ergebnisse**

Im Mittel der Standorte und Jahre war der Ertrag und damit auch die Marktleistung von Weizen in den Verfahren Pflug, Locker und Mulch annähernd gleich, jedoch im Verfahren Direktsaat etwas niedriger (Tab. 1). Dabei war die Marktleistung in allen Bodenbearbeitungsverfahren von Weizen nach Vorfrucht Zuckerrübe 40 - 50 € ha<sup>-1</sup> höher als nach Vorfrucht Getreide. Vergleichsweise große Unterschiede zwischen den Boden-

Tab. 1: Ertrag, Marktleistung, Kosten und Vergleichsdeckungsbeitrag von Weizen nach Vorfrucht Zuckerrübe (ZR) und Getreide (G) bei dauerhaft differenzierter Bodenbearbeitung, Mittel über 10 Standorte, 1994 - 2005, reale Kosten und Erlöse aus den Versuchsjahren in € ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>, n = 53

Bodenbearbeitungsverfahren Vorfrucht	Pflug		Locker		Mulch		Direktsaat	
	ZR	G	ZR	G	ZR	G	ZR	G
Ertrag [t ha <sup>-1</sup> ]	79,0	76,2	78,9	75,9	79,0	76,2	76,8	73,5
Marktleistung	1291	1241	1278	1235	1284	1233	1253	1207
Saatgut	} variable Kosten		64	63	64	63	64	71
Düngemittel	}		140	147	140	147	140	147
Pflanzenschutz	}		97	149	97	157	99	179
Lohnmaschinen / Zins	}		126	128	126	129	126	112
variable Verfahrenskosten	}		68	81	43	58	37	30
feste Verfahrenskosten	} feste Kosten		77	91	60	75	53	47
Lohnanspruch	}		48	59	32	42	26	23
Gesamtkosten	620	718	562	671	545	656	512	609
<b>Vergleichsdeckungsbeitrag</b>	<b>671</b>	<b>522</b>	<b>716</b>	<b>563</b>	<b>740</b>	<b>576</b>	<b>740</b>	<b>580</b>

bearbeitungsverfahren traten bei den Produktionskosten auf. Der Aufwand für Saatgut wurde lediglich beim Stoppelweizen in der Variante Direktsaat aufgrund schlechterer Feldaufgänge in den letzten Jahren der Versuchsdurchführung um 10 % erhöht. Die Aufwendungen für Pflanzenschutz stiegen mit abnehmender Eingriffsintensität vor allem durch den zusätzlichen Einsatz nicht selektiver Herbizide vor der Aussaat des Getreides. Der generell höhere Pflanzenschutzaufwand im Stoppelweizen resultierte aus einer höheren Applikation an Fungiziden. Die variablen sowie die festen Verfahrenskosten und der Lohnanspruch sanken mit abnehmender Eingriffsintensität erheblich, so dass die steigenden Aufwendungen für Pflanzenschutzmittel bei abnehmender Eingriffsintensität vollständig kompensiert wurden. Die Gesamtkosten sanken von Pflug zu Direktsaat um etwa 100 € ha<sup>-1</sup> und der Unterschied zwischen Stoppel- und Rübenweizen betrug

durchschnittlich in allen Verfahren etwa weitere 100 € ha<sup>-1</sup>. Der Vergleichsdeckungsbeitrag stieg gering, aber generell mit abnehmender Eingriffsintensität und war zwischen den Varianten Mulch und Direktsaat etwa gleich hoch. In Rübenweizen ergab sich ein etwa 150 € ha<sup>-1</sup> höherer Deckungsbeitrag als in Stoppelweizen.

Tab. 2: Bereinigter Zuckerertrag (BZE), Marktleistung, Kosten und Vergleichsdeckungsbeitrag von Zuckerrüben bei dauerhaft differenzierter Bodenbearbeitung, Mittel über 10 Standorte, 1994 - 2005, reale Kosten und Erlöse aus den Versuchsjahren in € ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>, n = 32

<b>Bodenbearbeitungsverfahren</b>	<b>Pflug</b>	<b>Locker</b>	<b>Mulch</b>	<b>Direktsaat</b>	
BZE [t ha <sup>-1</sup> ]	9,3	9,4	9,2	8,0	
Marktleistung	2919	2948	2889	2512	
Saatgut	} variable Kosten	227	228	228	242
Düngemittel		157	157	157	157
Pflanzenschutz		287	309	308	349
Lohnmaschinen / Zins		236	237	237	239
variable Verfahrenskosten		109	87	82	65
feste Verfahrenskosten	} feste Kosten	122	108	103	84
Lohnanspruch		73	59	54	44
Gesamtkosten	1211	1185	1169	1180	
<b>Vergleichsdeckungsbeitrag</b>	<b>1709</b>	<b>1763</b>	<b>1721</b>	<b>1331</b>	

Beim Anbau von Zuckerrüben waren ebenfalls die Verfahren Pflug, Locker und Mulch im Bereinigten Zuckerertrag (BZE) und der Marktleistung annähernd gleich hoch (Tab. 2), jedoch in Direktsaat etwa 15 % bzw. etwa 350 € ha<sup>-1</sup> niedriger. Mit der Eingriffsintensität sanken die variablen sowie die festen Verfahrenskosten und der Lohnanspruch. Demgegenüber waren die Saatgutkosten im Verfahren Direktsaat deutlich erhöht, da in diesem Verfahren durch erfahrungsgemäß geringeren Feldaufgang die Ablageentfernung von 19 cm auf 17 cm reduziert wurde. Weiterhin stiegen mit abnehmender Eingriffsintensität die Pflanzenschutzmittelkosten durch den zusätzlichen Einsatz nicht selektiver Herbizide vor der Aussaat der Zuckerrüben. Zudem stieg bei pflugloser Bodenbearbeitung der Aufwand für Rodentizide und Molluskizide. Die Produktionskosten von Zuckerrüben waren mit etwa 1200 € ha<sup>-1</sup> doppelt so hoch wie die von Getreide, differenzierten aber nur vergleichsweise gering zwischen den Bodenbearbeitungsvarianten.

Die Gesamtkosten zwischen den Varianten Pflug und Mulch unterschieden sich nur marginal um maximal 42 € ha<sup>-1</sup>. Somit war der Vergleichsdeckungsbeitrag in den Verfahren Locker und Mulch gegenüber Pflug leicht erhöht, während er in Direktsaat etwa 400 € ha<sup>-1</sup> niedriger lag.

Tab. 3: Mittlere jährliche Marktleistung, Kosten und Vergleichsdeckungsbeitrag der Rotation Zuckerrübe - Weizen - Weizen bei dauerhaft differenzierter Bodenbearbeitung, 10 Standorte, 1994 - 2005, reale Kosten und Erlöse aus den Versuchsjahren in € ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>, n = 85

<b>Bodenbearbeitungsverfahren</b>	<b>Pflug</b>	<b>Locker</b>	<b>Mulch</b>	<b>Direktsaat</b>
Marktleistung	1895	1899	1878	1718
variable Kosten	706	693	688	701
feste Kosten	156	125	114	86
Gesamtkosten	862	818	802	787
<b>Vergleichsdeckungsbeitrag</b>	<b>1031</b>	<b>1080</b>	<b>1075</b>	<b>930</b>

Über die gesamte Rotation ähnelten sich die mittlere jährliche Marktleistung der Varianten Pflug, Locker und Mulch (Tab. 3). Durch den deutlich geringeren Ertrag der Zuckerrübe im Verfahren Direktsaat war die Marktleistung über die Rotation etwa 170 € ha<sup>-1</sup> niedriger im Vergleich zu den übrigen Varianten. Die Gesamtkosten sanken mit abnehmender Eingriffsintensität um etwa 100 € ha<sup>-1</sup>. Der höchste Vergleichsdeckungsbeitrag der Rotation wurde in den konservierend bearbeiteten Verfahren Locker und Mulch bei gleicher Marktleistung aber niedrigeren Produktionskosten erzielt. Im Verfahren Pflug verminderte sich der Vergleichsdeckungsbeitrag durch höhere Kosten für die Bodenbearbeitung leicht. Im Verfahren Direktsaat waren die Kosten am niedrigsten. Dennoch sank der Vergleichsdeckungsbeitrag durch die niedrigere Marktleistung deutlich.

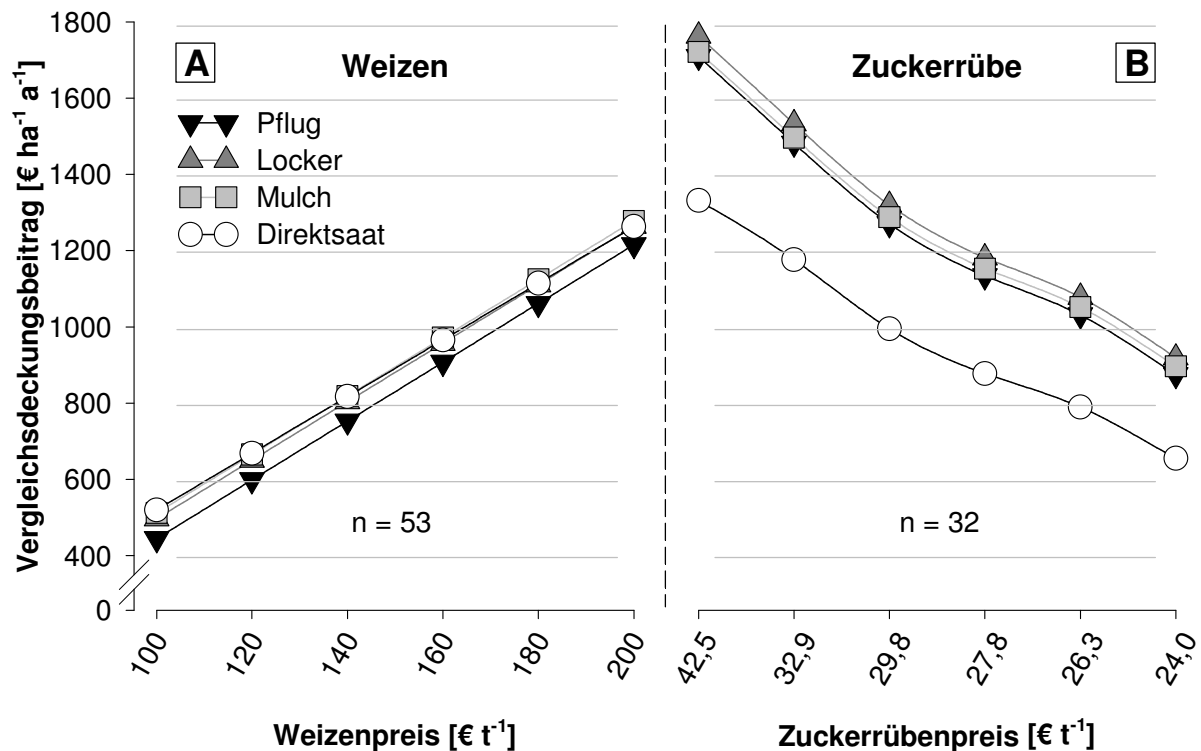


Abb. 1: Vergleichsdeckungsbeitrag von Weizen (A) und Zuckerrübe (B) in Abhängigkeit variabler Produktpreise bei gleichen Kosten (real je Versuchsjahr), 10 Standorte, 1994 - 2005

Steigende Weizenpreise führten in allen Bodenbearbeitungsvarianten zu einem deutlichen Anstieg des Vergleichsdeckungsbeitrags (Abb. 1 A). Dabei war der Vergleichsdeckungsbeitrag der pfluglosen Bodenbearbeitungsverfahren unabhängig von den Weizenpreisen stets höher als in der Variante Pflug. Ab einem Getreidepreis von etwa 140 € t<sup>-1</sup> kann der geringe Minderertrag im Verfahren Direktsaat nicht mehr vollständig durch die niedrigeren Produktionskosten kompensiert werden, wodurch der Vergleichsdeckungsbeitrag geringfügig unter den der Verfahren Locker und Mulch sinkt.

Bei Zuckerrüben blieb der Vergleichsdeckungsbeitrag unabhängig vom Rübenpreis in den konservierend bearbeiteten Varianten Locker und Mulch am höchsten und in der Variante

Pflug geringfügig niedriger (Abb. 1B). Das Verfahren Direktsaat wies bei allen Rübenpreisen einen verminderten Vergleichsdeckungsbeitrag auf, der mit sinkendem Rübenpreis um 400 bis 200 € ha<sup>-1</sup> niedriger war als in den Verfahren Mulch und Locker.

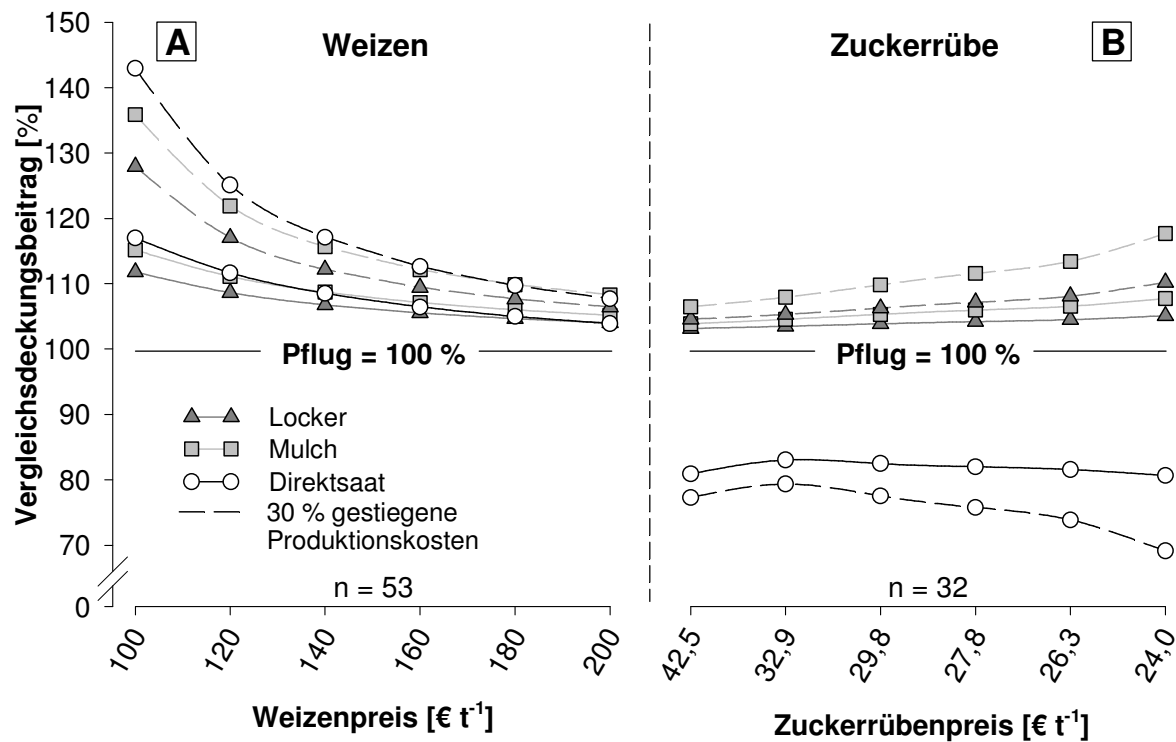


Abb. 2: Relativer Vergleichsdeckungsbeitrag von Weizen (A) und Zuckerrübe (B) bei langjährig differenzierter Bodenbearbeitung unter real im Versuchsjahr ermittelten (1994 - 2005) und pauschal 30 % gestiegenen Produktionskosten. 10 Standorte, 1994 - 2005, relativ, Pflug = 100 %, n = 53

Bei Weizen war der Vergleichsdeckungsbeitrag bei pflugloser Bodenbearbeitung unabhängig vom Weizenpreis deutlich höher als in der Variante Pflug (Abb. 2). Bei hohen Produktionskosten und niedrigem Weizenpreis war dieser Unterschied am stärksten und nahm mit steigenden Weizenpreisen ab. Innerhalb der pfluglosen Verfahren war der

Vergleichsdeckungsbeitrag im Verfahren Locker stets geringer als in den Verfahren Mulch und Direktsaat. Dagegen war der Vergleichsdeckungsbeitrag im Verfahren Direktsaat bei niedrigem Weizenpreis höher und bei hohem Weizenpreis, wenn auch nur geringfügig, niedriger als im Verfahren Mulch. Ein gleicher Vergleichsdeckungsbeitrag zwischen den Verfahren Mulch und Direktsaat lag bei niedrigen Produktionskosten bei einem Weizenpreis von  $140 \text{ € t}^{-1}$ , bei 30 % höheren Produktionskosten jedoch bei  $180 \text{ € t}^{-1}$ . Ursache hierfür war die ertragsbedingt geringere Marktleistung in Direktsaat, die bei steigenden Produktionskosten vermehrt kompensiert werden konnte.

### **Fazit**

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass pfluglose Bodenbearbeitung sowohl den ökonomischen Anforderungen der Landwirtschaft als auch den ökologischen Belangen der Gesellschaft gerecht werden kann. Grundsätzlich besteht ein enger Zusammenhang zwischen Eingriffsintensität und ökologischer Leistung eines Bodenbearbeitungsverfahrens. Je weniger intensiv bearbeitet wird, desto mehr wird die Bodenstruktur stabilisiert und das Bodenleben sowie die natürlichen Bodenfunktionen gefördert.

Mit pflugloser Bodenbearbeitung können gleich hohe Erträge wie bei einer konventionellen Bodenbearbeitung mit dem Pflug erzielt werden. Dies gilt insbesondere für den Anbau von Weizen, aber auch für Zuckerrüben, wobei der Ertrag von Zuckerrüben grundsätzlich positiv durch eine tiefere Lockerung beeinflusst wird. Lediglich der vollständige Verzicht auf Bodenbearbeitung (Direktsaat) führte bei Weizen in einigen Umwelten zu leichten, bei Zuckerrübe jedoch stets zu gravierenden Mindererträgen.

Bei gleichem Ertrag wird die relative wirtschaftliche Vorzüglichkeit eines Anbauverfahrens in hohem Maß von den Produktionskosten bestimmt. Veränderte Erlös/Kosten-Situationen können dabei grundsätzlich die relative wirtschaftliche Vorzüglichkeit der Anbauverfahren verschieben.



Konkret bedeutet dies für den Anbau von Weizen, dass der hohe Primärenergie- und Zeitbedarf für das Pflügen zu einem deutlichen Anstieg der variablen und festen Verfahrenskosten sowie des Lohnanspruches führt. Daraus ergibt sich auch unter veränderten Produktionsbedingungen wie höheren Erzeugerpreisen und Produktionskosten stets ein niedriger Vergleichsdeckungsbeitrag beim Einsatz des Pfluges. Die wirtschaftliche Vorzüglichkeit unterschiedlicher pflugloser Bodenbearbeitungsverfahren hingegen verändert sich nur wenig.

Eine Besonderheit stellt in diesem Kontext das Verfahren Direktsaat ohne jegliche Bodenbearbeitung dar. Unter den aktuellen monetären Produktionsbedingungen kompensieren erheblich niedrigere Produktionskosten beim Anbau von Weizen die in einigen Umwelten aufgetretenen Mindererträge vollständig, so dass der Vergleichsdeckungsbeitrag in Direktsaat ähnlich hoch wie in den pfluglos bearbeiteten Verfahren Locker und Mulch ist.

Betrachtet man jedoch das Produktionsverfahren Weizen getrennt nach Vorfrucht Zuckerrübe und Getreide, so ergeben sich insbesondere beim Stoppelweizen im Verfahren Direktsaat stark erhöhte Aufwendungen für Pflanzenschutzmittel ab. Unterschiede zwischen den Verfahren sind hierbei sowohl bei den Herbiziden, den Fungiziden sowie den Rodentiziden vorhanden. Pflanzenbauliche Maßnahmen reichen hier oftmals nicht, um Ertrag und Qualität des Erntegutes zu schützen.

Demgegenüber kann bereits eine flache Bodenbearbeitung wie im Verfahren Mulch eine ausreichende Einmischung von Ernterückständen der Vorfrucht bewirken, so dass Unkraut- und Schädlingsdruck stark vermindert sind. Der Druck von pilzlichen Schaderregern kann durch die Wahl einer gesunden Sorte soweit reduziert werden, dass bei Vorfrucht Zuckerrübe kein und bei Vorfrucht Getreide lediglich ein geringer Mehraufwand an Pflanzenschutzmitteln erforderlich ist.

Es sollte daher kritisch hinterfragt werden, ob Direktsaat von Weizen nach Vorfrucht Getreide im Hinblick auf den deutlich erhöhten Pflanzenschutzaufwand ökologisch gerechtfertigt werden kann, wenn zugleich alternative Verfahren pflugloser Bodenbearbeitung existieren, die ein ausgewogenes Gleichgewicht zwischen ökonomischen und ökologischen Aspekten der Produktion beinhalten.

Beim Anbau von Zuckerrüben unterscheiden sich die Produktionskosten zwischen den Verfahren nur gering. Die Einsparungen durch den Verzicht auf den Pflug werden größtenteils durch zusätzlich erforderliche Applikationen nicht selektiver Herbizide kompensiert. Insgesamt liegt die relative wirtschaftliche Vorzüglichkeit in den mischend bearbeiteten Verfahren Locker und Mulch leicht über der gepflügten Variante. Steigende Produktionskosten und ein abnehmender Rübenpreis führen dennoch zu einer leichten Steigerung der relativen Vorzüglichkeit pflugloser Bodenbearbeitung, insbesondere der Mulchsaat. Im Gegensatz zu Getreide stellt Direktsaat für den Anbau von Zuckerrüben auch bei veränderten ökonomischen Rahmenbedingungen keine Alternative dar. Ursache dafür sind der gravierend niedrigere Rübenenertrag und die vergleichsweise geringen Einsparungen an Produktionskosten.

Die ökologische Leistung pflugloser Bodenbearbeitung zu Zuckerrüben ist als besonderst hoch einzustufen, da der Anbau hinsichtlich der Erosionsanfälligkeit während der Jugendentwicklung als besonderst sensibel gilt. Um dem § 17 BBodSchG „Gute fachliche Praxis in der Landwirtschaft“ gerecht zu werden, aber auch aus eigenem Interesse der Landwirtschaft den Produktionsfaktor Boden zu schützen, müssen pfluglose Bodenbearbeitungsverfahren eine weitere Verbreitung finden.

Insgesamt zeigt sich, dass in der Fruchtfolge Zuckerrüben - Weizen - Weizen auch bei veränderten ökonomischen Rahmenbedingungen eine fruchtartspezifische Bearbeitung am besten in der Lage ist, den Vergleichsdeckungsbeitrag zu maximieren. Zum Anbau von Getreide kann die Eingriffsintensität weitgehend reduziert werden. Die Zuckerrübe hingegen benötigt eine deutlich höhere Eingriffsintensität in Form einer mind. 10 cm, eher 15 cm tiefen, mischenden Lockerung.

Dabei darf nicht außer Acht gelassen werden, dass pfluglose Bodenbearbeitungsverfahren erhöhte Anforderungen an das Management stellen. Die Wahl eines Bodenbearbeitungsverfahrens erfordert oftmals weitere Veränderungen der Bewirtschaftungsweise und muss in diesem Zusammenhang als integrativer Bestandteil eines Bewirtschaftungskonzeptes gesehen werden. Um eine weitere Verbreitung pflugloser Bodenbearbeitungsverfahren zu erzielen, besteht künftig weiterer Forschungsbedarf im Bereich der Aussaat- und Ernte-technik. Um Landwirte bei der Umstellung der Produktionsverfahren zu unterstützen und neue Verfahren erfolgreich zu etablieren, ist in vielen Fällen eine intensive Beratung erforderlich.

## VI Literatur

- AHL, C., JOERGENSEN, R.G., KANDELER, E., MEYER, B. & WOehler, V., 1998: Microbial biomass and activity in silt and sand loams after long-term shallow tillage in central Germany. *Soil Till Res.* 49, 93-104.
- BAEUMER, K., 1985: Bodenbearbeitung und Fruchtfolge. Hochschultagung 1985, Arbeitskreis Ackerbau, Universität Göttingen, 1-23.
- Baeumer, K., 1994: Verfahren und Wirkungen der Bodenbearbeitung. In: Integrierter Landbau (Diercks, R. & Heitefuss, R., Hrsg.). Verlagsunion Agrar, 68-87.
- BBODSCHG, 1998: Gesetz zum Schutz des Bodens. *Bundesgesetzblatt*, Teil I Nr.16, 502-510.
- BECKER, C., 1997: Dauerhaft pfluglose Bodenbearbeitungssysteme und Betriebsgröße – eine pflanzenbaulich-ökonomische Analyse. Dissertation, Universität Göttingen.
- BEESE, F., 1997: Multitalent. Die vielfältigen Funktionen des Bodens. – Politische Ökologie, 15. Jg., Sonderheft 10 „Bodenlos“: 17-22.
- BMVEL – Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft, 2001: Gute fachliche Praxis zur Vorsorge gegen Bodenschadverdichtungen und Bodenerosion, Bonn.
- BOARDMAN, J.A., 1990: Soil erosion and agricultural land, Wiley, Chichester.
- BRUNOTTE J., WEIßBACH, M., ROGASIK, H., ISENSEE, E. & SOMMER, C., 2000: Zur guten fachlichen Praxis beim Einsatz moderner Zuckerrübenerntetechnik. *Zuckerrübe* 49, 34-40.
- BRUNOTTE, J., 1991: Maßnahmen zum Bodenschutz im Zuckerrübenanbau KTBL - Arbeitspapier 159. Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft (MEG) 183, 205.
- BRUNOTTE, J., 2007: Konservierende Bodenbearbeitung als Beitrag zur Minderung von Bodenschadverdichtungen, Bodenerosion, Run off und Mykotoxinbildung im Getreide. *Landbauforschung Völkenrode* : Sonderheft 305 [Habilitation]
- CARTER, M.R., 1994: A review of conservation tillage strategies for humid temperate regions. *Soil Till Res.* 31, 289-301.
- CHRISTEN, O., 1999: Nachhaltige Landwirtschaft („Sustainable agriculture“) Ideengeschichte, Inhalte, Konsequenzen für Forschung, Lehre und Beratung. *Berichte über Landwirtschaft* 74, 66-86. KTBL 2003.
- Czeratzki, W., 1972: Die Ansprüche der Pflanzen an den physikalischen Bodenzustand. *Landbauforschung Völkenrode* 22, 1587-1593.
- DÍAZ-ZORITA, M. & GROVE J. H., 2002: Duration of tillage management affects carbon and phosphorus stratification in phosphatic Paleudalfs. *Soil Till Res.* 66, 165-174.

- DIECKMANN, J., MILLER, H., & KOCH, H.-J., 2004: Einfluss unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren auf die Erosionsanfälligkeit bei Starkregen. Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss. 16, 159-160.
- DIECKMANN, J., MILLER, H. & KOCH, H.-J., 2006: Beet growth and soil structure – results from a long term on-farm joint research project (in German). Sugar Ind. 131, 642-654.
- DIECKMANN, J. & KOCH, H.-J., 2008: Einfluss langjährig differenzierter Bodenbearbeitung auf chemische Bodeneigenschaften und Zuckerrübenenertrag. Pflanzenbauwiss. 12, 22-31.
- DIECKMANN, J., KOCH, H.-J., BÜCHSE, A. & MÄRLÄNDER, B., 2008 a: Yield decrease of sugar beet caused by reduced tillage and direct drilling is related to plant population and soil structure. J Agron Crop Sci. (eingereicht).
- DRAYCOTT, A.P., HULL, R., MESSEM, A.B. & WEBB, D.J., 1970: Effects of soil compaction on Yield and fertilizer requirement of sugar beet. J Agr. Sci. 75, 533-537.
- EHLERS, W., WERNER, D. & MÄHNER, T., 2000: Wirkung mechanischer Belastung auf Gefüge und Ertragsleistung einer Löss-Parabraunerde mit zwei Bearbeitungssystemen. J. Plant Nutr. Soil Sci. 163, 321-333.
- EPPERLEIN, J., 2001: Vergleichende Untersuchungen zum Einfluss konservierender Bodenbearbeitung auf ausgewählte biologische und physikalische Bodenparameter im Biosphärenreservat Schorfheide-Chorin. Dissertation, Berlin.
- FRIELINGHAUS, M. & BORK, H.-R., 1999: Schutz des Bodens. Economica Verlag, Bonn.
- FRIELINGHAUS, M. & GRIMME, H., 1999: Boden als begrenzte Ressource – Begründung für den Bodenschutz. In: BUCHWALD, K. / ENGELHARDT, W. (1999): Umweltschutz: Grundlagen und Praxis: Bd. 4. Schutz des Bodens. Bonn: Economica Verlag . IPCC, 2007.
- FRIELINGHAUS, M., BRANDHUBER, R., & SCHMIDT, W.-A., 2001: Vorsorge gegen Bodenerosion im Bodenschutzrecht. Wasser & Boden. 53, 25-31.
- GISI, U., SCHENKER, R., SCHULIN, R., STADELMANN, X.F. & STICHER, H., 1997: Bodenökologie. Thieme Verlag, Stuttgart, New York.
- HARRACH, T. & VORDERBRÜGGE, T., 1991: Die Wurzelentwicklung von Kulturpflanzen in Beziehung zum Bodentyp und Bodengefüge. In: Berichte über Landwirtschaft 204, 69-82.
- HEINONEN, M., ALAKUKKU, L. & AURA, E., 2002: Effects of reduced tillage and light tractor traffic on the growth and yield of oats (*Avena sativa*). In: Pagliari, M., Jones, R. (Eds.), Sustainable Land Management – Environmental Protection, Advances in Geoecology 35, Catena, Reiskirchen, 367-378.
- HEUER, H., TOMANOVÁ, O. & KOCH, H.-J., 2006: Vorsorgender Bodenschutz bei der Rüben-ernte: Einfluss wiederholter Befahrung bei differenzierter Bodenbearbeitung. Zuckerindustrie 9, 777-784.

- HOFFMANN, C., 1997: Wachstumsanalyse von Zuckerrüben bei langjährig differenzierter Bodenbearbeitung. Pflanzenbauwiss. 1, 164-170.
- JAGGARD, K.W., 1977: Effects of soil density on yield and fertilizer requirement of sugar beet. Ann. Appl. Biol. 86, 301-312.
- STOTT, L.D., CANNARIATO, K.G., THUNELL, R., HAUG, G.H., KOUTAVAS, A., & LUND, S., 2004: Decline of surface temperature and salinity in the western tropical Pacific Ocean in the Holocene epoch. Nature 431, 56-59.
- LIEBHARD, P., 1997: Einfluss der Primärbodenbearbeitung auf Ertrag, Ertragsverhalten und ausgewählte Qualitätskriterien von Zuckerrübe (*Beta vulgaris* L. ssp. *vulgaris* var. *altissima* Doell) im oberösterreichischen Zentralraum (Teil 8). Bodenkultur 48, 3-14.
- LINDSTROM, M.J. & ARCHER, D.W., 2003: Crop residue management in the United States. Landbauforschung Voelkenrode Sonderheft. 256, 11-16.
- MAIDL, F. X., KNITTEL, H. & FISCHBECK, G., 1982: Der Einfluß des Bodengefüges auf die Ertragsbildung von Zuckerrüben. J. Agron. Crop Sci. 151, 275-281.
- OLDMANN, C. R., HAKKELING, R. T. A. & SOMBROCK V. G., 1991: World Map of the Status of Human-induced Soil Degradation. Global Assessment of Soil Degradation GLASOD. Wageningen: International Soil Reference and Information Centre (ISRIC).
- PEKRUN C. & CLAUPEIN W., 1998: Forschung zur reduzierten Bodenbearbeitung in Mitteleuropa: eine Literaturübersicht. Pflanzenbauwiss. 2, 160-175.
- PEKRUN, C., KAUL, H.-P. & CLAUPEIN, W., 2003: Soil Tillage for sustainable nutrient management. Ed.: El Titi, A. In: Soil Tillage in Agroecosystems, CRC Press.
- PRINGAS, C., 2005: Reduzierte Bodenbearbeitungsintensität in einer Zuckerrüben-Winterweizen-Winterweizen-Fruchtfolge – Konzept für eine nachhaltige Entwicklung der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion. Dissertation, Universität Göttingen.
- RICHARD, G., BOIFFIN, J. & DUVAL, Y., 1995: Direct drilling of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) into a cover crop: effects on soil physical conditions and crop establishment. Soil Till Res. 34, 169-185.
- RICHTER, U., 1995: Einfluss langjährig differenzierter Bodenbearbeitungssysteme auf das Bodengefüge und den Stickstoffhaushalt. Boden und Landschaft 4.
- SCHOLZ, G., QUINTON, J.N. & STRAUSS, P., 2007: Soil erosion from sugar beet in Central Europe in response to climate change induced seasonal precipitation variations. Catena (2007), doi:10.1016/j.catena.2007.04.005.
- SOMMER, C., 1998: Ein Konzept zur Vorbeugung von Bodenschadverdichtungen in der pflanzlichen Produktion. Bodenschutz (1), 12-16.

- STOCKFISCH, N., FORSTREUTER, T. & EHLERS, W., 1999: Ploughing effects on soil organic matter after twenty years of conservation tillage in Lower Saxony, Germany. *Soil Till Res.* 52, 91-101.
- TENHOLTERN, R., 2000: Bodengefüge, Durchwurzelung und Ertrag als Indikatoren für Lockerungsbedürftigkeit und Lockerungserfolg auf rekultivierten Standorten im rheinischen Braunkohlenrevier. *Boden und Landschaft* 28, Justus-Liebig-Universität Gießen.
- TOMANOVÁ, O., STOCKFISCH, N. & KOCH, H.-J., 2006: Einfluss langjährig differenzierter Bodenbearbeitung auf Wachstum und Nährstoffversorgung von Zuckerrüben während der Vegetationsperiode. *Pflanzenbauwiss.* 10, 16-25.
- VAN DER VEER, S., MEYER, M., CHERVET, A., STURNY, W.G. & WEISSKOPF, P., 2005: Physikalische Bodenbelastungen bei der Zuckerrübenernte, *Agrarforschung* 12, 472-477.
- WALDORF, N.V. & SCHULZE, R., 2003: Auswirkungen verschiedener Bodenbearbeitungsverfahren auf pflanzenbauliche Parameter. *Landinfo* 9, 6-10.
- WCED – The World Commission on Environment and Development, 1987: *Our Common Future* (Brundtland-Commission). Oxford University Press.
- WEGENER, U., 2001: Dauerhafte Bodenbearbeitungsverfahren in Zuckerrübenfruchtfolgen – Ertragsbildung, Rentabilität, Energiebilanz und Bodenerosion. Dissertation, Universität Göttingen.

## Danksagung

Herrn Prof. Dr. B. Märländer möchte ich herzlich für die Überlassung des Themas und die Übernahme des Referates danken. Sein Engagement und seine Unterstützung, insbesondere in der Endphase meiner Promotion, haben maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Ganz besonders möchte ich mich für die Möglichkeit der Teilnahme an 5 interessanten Doktorandenexkursionen sowie zahlreichen Tagungen rund um die Zuckerrübe bedanken.

Herrn Prof. Dr. W. Lücke danke ich für die freundliche Bereitschaft, das Korreferat zu übernehmen.

Herrn PD Dr. J. Schulze möchte ich für die spontane Bereitschaft der Übernahme der Drittprüferschaft danken.

Dem Kuratorium für Versuchswesen und Beratung im Zuckerrübenanbau, Ochsenfurt, danke ich herzlich für die finanzielle Unterstützung dieses Vorhabens. Auch den Mitgliedern des Themenkreises Pflanzenbau und Bodenbearbeitung des Kuratoriums sei für die fruchtbaren Diskussionen und konstruktiven Anregungen gedankt.

Besonderer Dank für die uneingeschränkte Unterstützung in allen Belangen der praktischen Versuchsdurchführung gebührt dem Geschäftsbereich Landwirtschaft der Südzucker AG in Offenau. Insbesondere Herrn Dir. H. Miller und seinen Kollegen D. Schuhmann, M. Müller und Dr. J. Scherer, möchte ich für das große Engagement „rund um die Versuche“, die ständige Diskussionsbereitschaft und die angenehme Zusammenarbeit recht herzlich danken. Für die Durchführung aller Anbaumaßnahmen in den Bodenbearbeitungsversuchen, die nicht immer ohne Schwierigkeiten in den Arbeitsablauf der Landwirtschaftsbetriebe zu integrieren waren, für den stets fruchtbaren Erfahrungsaustausch, aber auch für die herzliche Aufnahme und die gute Verpflegung „in schweren Zeiten“ sei den Betriebsleitern P. Anders, C. Bernhard, M. Döbler, K. Herrmann, D. Kühne, M. Peschke, L. Peter, R. Rühl, W. Schmitt, und E. Steigerwald, sowie deren Familien recht herzlich gedankt.

Meinen Kolleginnen und Kollegen des Instituts für Zuckerrübenforschung – speziell aus der Abteilung Pflanzenbau – möchte ich meinen herzlichen Dank für die gute Zusammenarbeit und das angenehme Arbeitsklima aussprechen. In diesem Zusammenhang möchte ich besonders den Ehemaligen der Abteilung Pflanzenbau Hans-Peter, Vera und vor allem Svea danken. Friederike und Henning danke ich für die zahlreichen Mittagessen, das eine oder andere Bier, sowie die wunderbare Freundschaft ohne die diese Arbeit wahrscheinlich nicht entstanden wäre. Aber auch den restlichen Mitgliedern der „Clique“ sei an dieser Stelle



für die schöne und vor allem lustige Zeit, sowie die vielen unerschöpflichen Diskussionen weit über die Zuckerrübe hinaus gedankt.

Noch ein besonderer Dank geht an die technischen Mitarbeiter der Abteilung Pflanzenbau Ines Wiese, Wilfried Hübener und Manfred Jordan, sowie deren Familien. Die umfangreichen Probenahmen im Versuch, deren Notwendigkeit ich damals nicht immer für Praktiker plausibel vermitteln konnte, haben die ein oder andere mehrtägige Reise erfordert. Dabei hat das überaus gute Verhältnis weit über die dienstliche Zusammenarbeit hinaus unsere zahlreichen „Ausflüge“ zu unvergesslichen Erlebnissen werden lassen, an die ich immer gern zurückdenken werde. Natürlich danke ich an dieser Stelle auch den treuen Hiwis, die mich während der Versuchsdurchführung begleitet haben.

Der bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft danke ich für die Bereitschaft, einen Teil der Stechzylinder für uns zu analysieren. Dabei bedanke ich mich insbesondere bei Jürgen Kleer für die unkomplizierte und angenehme Zusammenarbeit.

Herrn Dr. Karl Teiwes danke ich für den bodenkundlichen Beistand bei der Auswahl der Messfelder und der Gefügeansprache. Unsere Exkursionen waren sehr interessant, und haben mir die komplexe Sprache des Bodens ein wenig näher gebracht.

Für die vielfältigen Anregungen und die kritische Durchsicht einzelner Manuskripte danke ich speziell Frau Dr. N. Stockfisch, Frau Dr. S. Kluth, Frau Dr. S. Pacyna-Schürheck und Herrn H. Heuer.

Ganz herzlichen Dank möchte ich auch an meine Schwester Sylvie, ihren Lebensgefährten Bernd, sowie Christiane Uleer und Ruairi Wall richten, die mir bei der Erstellung des englischen Manuskriptes tatkräftig zur Seite standen und die keine Kritik selbsternannter Muttersprachler abschrecken konnte.

Meinen Freunden danke ich für Ihre Unterstützung und Toleranz sowie für die vielen aufmunternden Worte während der Erstellung dieser Arbeit.

Meinem Sohn Jannik danke ich für so manche Ablenkung während der Erstellung dieses Manuskriptes und seine wunderbare Art mich zum Lachen zu bringen und mal abzuschalten.

Meinen Eltern danke ich ganz besonders für ihre stetige Unterstützung während meiner gesamten Ausbildung, das mir entgegengebrachte Vertrauen, sowie ihren wohlthuenden Rückhalt und ihre tatkräftige Hilfe im Betrieb.

**Lebenslauf**

# Willy Jan Dieckmann

Master of Science

\*29. November 1976 in Hildesheim

## **Familienstand**

verheiratet, ein Sohn

## **Ausbildung**

**08/1989 - 06/1996**

Gymnasium, Michelsenschule Hildesheim, 31137 Hildesheim  
Abschluss: **Allgemeine Hochschulreife**

**10/1997 - 05/2002**

Agrarstudium (Fachrichtung Pflanzenbau) an der Fakultät für Agrarwissenschaften, Georg-August-Universität, 37075 Göttingen  
Abschluss: **Master of Science**

## **Berufliche Tätigkeiten**

**08/2002 - 02/2003**

Praktikum als Sachbearbeiter im Rübenmanagement Groß Munzel, Nordzucker AG, 38100 Braunschweig

**03/2003 - 08/2006**

Wissenschaftlicher Mitarbeiter (Doktorand) Abteilung Pflanzenbau, Institut für Zuckerrübenforschung, 37075 Göttingen

**11/2006 - 11/2007**

Sachbearbeiter Betriebsprämie in der Bewilligungsstelle Hannover Landwirtschaftskammer Niedersachsen, 26121 Oldenburg

**seit 11/2007**

Berater Pflanzenbau und Pflanzenschutz an der Bezirksstelle Northeim Landwirtschaftskammer Niedersachsen, 26121 Oldenburg

## **Studienbegleitende Tätigkeiten**

**07/1997 - 10/1997**

Erntehelfer  
Rittergut Schlüsselburg, 32469 Petershagen

**07/1998 - 10/1998**

Landwirtschaftliches Betriebspraktikum

**07/1999 - 10/1999**

ACT Land und Forst GmbH Siggen, 23777 Heringsdorf

**07/2000 - 10/2000**

Erntehelfer

**08/2001 - 10/2001**

Gut Tralauerholz, 23847 Rethwischdorf

## **Wehrdienst**

**09/1996 - 06/1997**

Grundwehrdienst

1./ Sanitätsbataillon 1, 31137 Hildesheim